

Joel Anttila

# Palloventtiilin pitopinnan vaurioanalyysi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

8.4.2017

Tekijä Otsikko	Joel Anttila Palloventtiilin pitopinnan vaurioanalyysi
Sivumäärä Aika	34 sivua + 2 liitettä 8.4.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaajat	Ylläpidon insinööri Martti Joensuu Lehtori Juha Kotamies
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Fortum Oy:n toimeksiantona Loviisan ydinvoimalalle. Ydinvoimalan RN- ja TN-sivulauhdejärjestelmässä on 50 palloventtiiliä. Niiden tiivisteet kuluvat nopeasti, mistä seuraa ongelmia venttiilin operoimiseen. Työn pääasiallisena tavoitteena oli selvittää, mistä kulumisen johtuu. Lisäksi pyrittiin etsimään ratkaisua ongelmaan muun muassa erilaisten pinnoitteiden avulla.</p> <p>Työssä tutkittiin Metson Jamesbury®-palloventtiilin tiivisteiden materiaalia ja sen nopeaa kulumista. Perehdyttiin kulumiseen vaikuttaviin tekijöihin ja materiaalin valintaan kohteisiin, joissa esiintyy kulumista. Lisäksi tarkasteltiin adhesiivisen ja abrasiivisen kulumisen vaikutusta kulumistapahtumassa.</p> <p>Työ aloitettiin tutustumalla Loviisan ydinvoimalan RN-sivulauhdejärjestelmään ja sen tärkeyteen voimalaitosprosessissa. Tutkittava lauhteenkeruusäiliön RN12B01 palloventtiilin tiiviste tutkittiin Metropolia Ammattikorkeakoulun laboratoriossa. Vertailemalla saatuja tuloksia markkinoilla oleviin pinnoitteisiin voitiin todeta pallon tiivistemateriaalin olevan Stellite 6™. Pinnoite oli onnistuneesti liitetty perusaineeseen, eikä siinä havaittu valmistusvirheitä, jotka voisivat heikentää sen kestävyyttä.</p> <p>Työssä tutustuttiin markkinoilla oleviin Tribaloy-T800™- ja kromioksidipinnoitteisiin sekä niiden ominaisuuksiin ja voitiin todeta, etteivät nämä poista kokonaan kulumisongelmaa johtuen materiaalien hauraudesta. Työssä myös esitellään vaihtoehtoinen non-contact-venttiilityyppi, jossa pitopinnat koskettavat toisiaan ainoastaan venttiilin ollessa täysin kiinni.</p> <p>Työn tuloksena saatiin varmuus, että lauhteenkeruusäiliön RN12B01 pinnansäätöventtiilin pallon tiivisteessä ei ole valmistusvirhettä. Nopea kulumisen johtuu pitopintaan kohdistuvasta suuresta pintapaineesta ja venttiilin jatkuvasta operoimisesta.</p>	
Avainsanat	Palloventtiili, kulumisen, pinnoite

Author Title	Joel Anttila Wear Analysis of Ball Valve Contact Surface
Number of Pages Date	34 pages + 2 appendices 8 April 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Program	Mechanical and Production Engineering
Specialisation option	Energy and Environmental Engineering
Instructors	Martti Joensuu, Maintenance Engineer Juha Kotamies, Senior Lecturer
<p>This Bachelor's thesis was made for Fortum Oy in co-operation with the Loviisa nuclear power plant. The RN- and TN-condensate systems of the nuclear power plant are equipped with 50 ball valves. The Seals of the ball valves wear out fast, which causes problems in valve operations.</p> <p>The main objective was to discover what causes the wear of ball valves. Another objective in the thesis was finding solutions to this problem by using different coatings.</p> <p>In the thesis, different seal materials and the fast wear in Metso -Jamesbury® ball valves were examined. The reasons for wear and the material selection in the locations were analyzed. Also the effects of adhesive and abrasive wear were examined.</p> <p>To start with, the RN-condensate system in the Loviisa nuclear power plant was studied. The ball valve seal was examined in the laboratory of Metropolia University of Applied Sciences. When comparing the results to the already existing seals in the market that the seal material in the ball valve was Stellite 6™. The seal was melted with the basic material and it was detected that there were no defects in the manufacturing process which could affect the performance.</p> <p>In the thesis, the coating materials Tribaloy-T800™ and Chrome oxide were analyzed. In the examination, it was discovered that these materials cannot solve the wear problem due to the brittleness of the materials. Also an alternative non-contact ball valve type was introduced. In this case, the contact surfaces were in contact only when the valve was completely closed.</p> <p>The results indicate that no flaws were detected in the manufacture of the surface control ball valve's seal of the condensation container RN12B01. The fast wear was caused by the great pressure in the surface area and the continuous operation of the valve.</p>	
Keywords	Ball valve, wear, coating

## Sisällys

### Lyhenteet

Johdanto	2
1.1 Työn tausta	2
1.2 Työn tavoitteet ja menettelytavat	2
2 Fortum Oyj	3
2.1 Yrityksen toiminta	3
2.2 Loviisan ydinvoimalaitos	5
3 RN-sivulauhdejärjestelmä	5
4 Metson Jamesbury® -palloventtiili	8
5 Tiivistepintojen välinen kosketus	10
6 Kuluminen	10
6.1 Kulumiseen vaikuttavat tekijät	11
6.2 Kulumiskestävyys	11
6.3 Materiaalin valitseminen	12
6.4 Adhesiivinen kuluminen	12
6.5 Abrasiivinen kuluminen	13
7 Mittausmenetelmät	15
7.1 Pyyhkäisymikroskooppi (SEM)	15
7.2 Vickers-kovuuskoe	15
8 Tutkimuksen suorittaminen ja tulokset	17
8.1 Silmämääräinen tarkastelu	17
8.2 Pinnoitteen mikrorakenteen tarkastelu	19
8.3 Pyyhkäisymikroskooppi (SEM)-analyysi	21
8.4 Pinnoitteen- ja perusaineen mikrorakenteen tarkempi tarkastelu	22
8.5 Pinnoitteen kovuuden mitta	25
8.6 Pinnoitteen materiaalin määrittäminen	25
9 Vaihtoehtoiset pinnoitteet	27



9.1	Tribaloy T-800™	27
9.2	Kromioksidi	29
10	Vaihtoehtoiset venttiilityypit kohteeseen	30
11	Päätelmät	31
12	Yhteenveto ja pohdinta	32
	Lähteet	33
	Liitteet	
	Liite 1. Metson palloventtiili, D-sarja	
	Liite 2. Kennametal™-kovapinnoitteet	

## Lyhenteet

ASME	The American Society of Mechanical Engineers
DN	Diameter Nominal
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
HV	Vicker-kovuus
HVOF	High Velocity Oxy-Fuel
MPa	MecaPascal
SEM	Scanning Electron Microscope
TIG	Tungsten Inert Gas
TWh	Terawattitunti
VTT	Teknologian tutkimuskeskus
$A$	Pinta-ala
$d$	Lävistäjien $d_1$ ja $d_2$ aritmeettinen keskiarvo
$E$	Kimmokerroin
$F$	Kuormitus
$F_N$	Normaalivoima
$H$	Materiaalin kovuus
$H_A$	Metallin kovuus täysin muokkauslujittuneena
$H_M$	Abrasiivisen pinnan kovuus
$q_c$	Tiivistepintojen välinen pintapaine
$\sigma_o$	Myötölujuus
$\alpha$	Painimen vastakkaisten sivutahkojen välinen kulma
$\text{CO}_2$	Hiilidioksidi
Co	Koboltti
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	Kromioksidi
Cr	Kromi

$\text{CuCl}_2$	Kuparikloridi
Cu	Kupari
Fe	Rauta
$\text{HNO}_3$	Typpihappo
HCl	Suolahappo
$\text{H}_2\text{O}$	Vesi
Si	Pii
Mn	Mangaani
Mo	Molybdeeni
Ni	Nikkeli
W	Volframi

## Johdanto

### 1.1 Työn tausta

Loviisan ydinvoimalassa käytetään RN-sivulauhdejärjestelmässä ja TN-apuhöyryjärjestelmässä Metson palloventtiileitä. Venttiileissä on havaittu pallon tiivisteiden nopeaa kulumista ja venttiileihin on jouduttu vaihtamaan pallo ja pallon tiiviste, jopa vuoden käytön jälkeen. Pallon tiivisteiden kuluminen on niin voimakasta, että se aiheuttaa ongelmia venttiilin operoimiseen. Voimalaitoksella on 50 kappaletta tämän tyyppisiä palloventtiileitä, joissa voimakasta kulumista esiintyy. Osa näistä venttiileistä on kriittisyysluokkaa 1, joten niiden vikaantuminen aiheuttaa turbiinin manuaalisen tai automaattisen alasajon. Turbiinin alasajosta ei aiheudu vaaraa ympäristölle, mutta taloudelliset menetykset ovat merkittäviä.

### 1.2 Työn tavoitteet ja menettelytavat

Opinnäytetyön tavoite on saada vähennettyä palloventtiilien huoltokustannuksia ja varmistaa voimalaitoksen toimintavarmuutta. Työssä tutkitaan lauhteenkeruusäiliön RN12B01 pinnasäätöventtiilin pallon tiivisteiden pinnoitetta ja pyritään selvittämään, mistä sen nopea kuluminen johtuu. Lisäksi pyritään etsimään ratkaisua ongelmaan muun muassa erilaisten pinnoitteiden avulla.

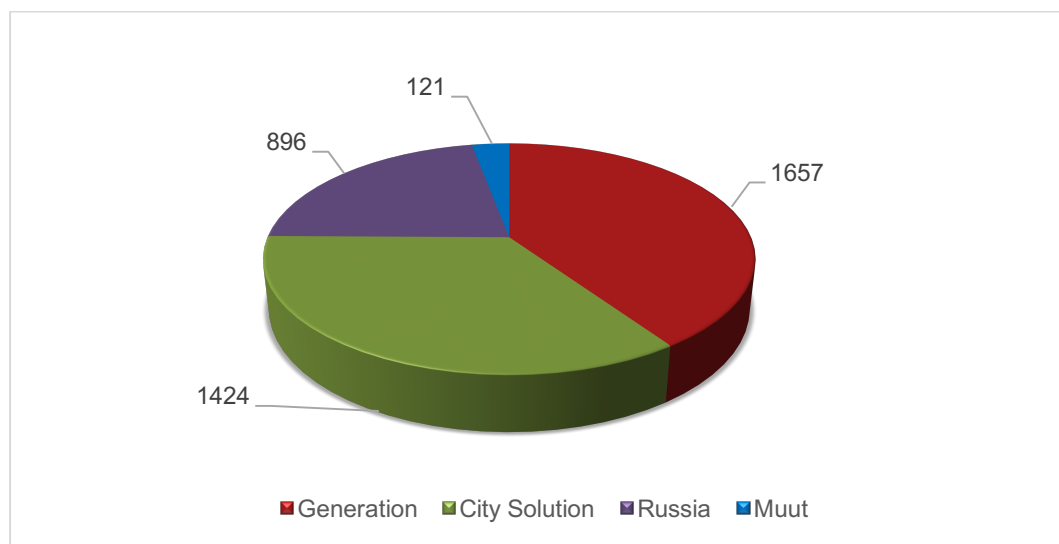
Tiivisteestä otetaan näytekappaleet. Näytekappaleista määritetään pinnoitteen ja perusaineen kovuudet. Tarkastellaan pinnoitteen mikrorakennetta valomikroskoopilla ja pyritään selvittämään, onko pinnoitteessa valmistusvirhettä. Perehdytään kulumismekanismeihin ja tiivisteiden pintapaineeseen. Tarkastellaan markkinoilla olevia pinnoitusmateriaaleja ja niiden soveltuvuutta kohteeseen.

## 2 Fortum Oyj

### 2.1 Yrityksen toiminta

Fortum on johtava puhtaan energian yhtiö, joka toimittaa asiakkaille sähköä, lämpöä ja jäähdytystä, sekä älykkäitä ratkaisuja resurssitehokkuuden parantamiseksi. Puhtaamman energian tuottamiseksi Fortum on perustanut kehitysyksiköt M&A and Solar & Wind Development ja Technology and New Ventures. Yrityksen sähköntuotannosta 64 % on CO<sub>2</sub>-päästötöntä.

Konsernin liikevaihto vuonna 2016 oli 3 632 miljoonaa euroa, ja se jakaantuu neljälle eri segmentille kuvaajan 1 mukaisesti [1];[2].



Kuvaaja 1. Fortumin liikevaihto segmenteittäin [2].

Generation vastaa Fortumin sähköntuotannosta Pohjoismaissa. Siihen kuuluvat ydinvoima-, vesivoima- ja lämpövoimatuotanto, sähköntuotannon optimointi ja sähkökauppa, markkina-analyysit sekä globaalisti ydinvoiman asiantuntijapalvelut.

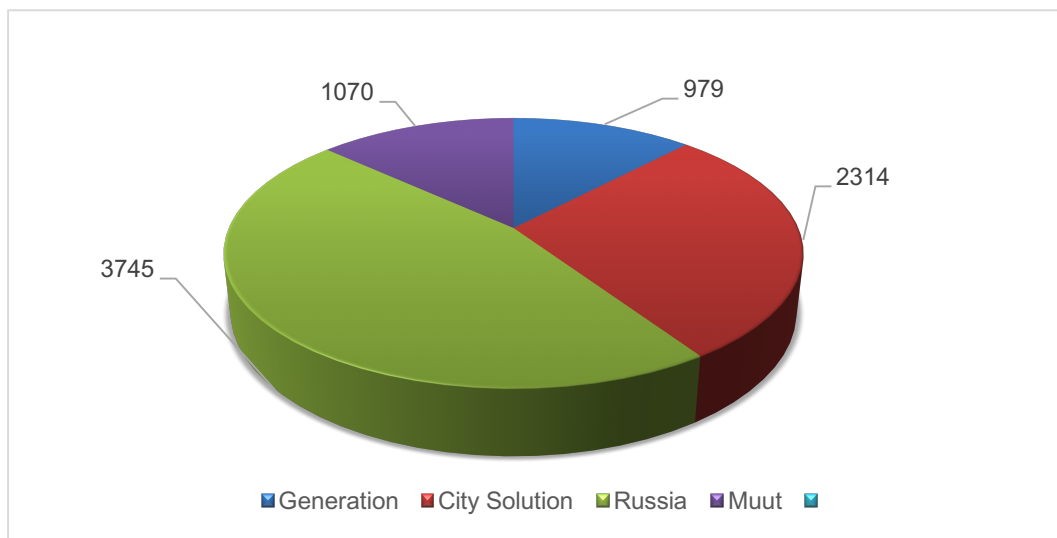
Generation tuotti sähköä Pohjoismaissa seuraavasti:

- vesivoima 20,7 TWh
- ydinvoima 24,1 TWh
- lämpövoima 0,5 TWh.

City Solution:in vastuulla on kehittää kestäviä kaupunkiratkaisuja. Segmenttiin kuuluu kaukolämpö ja -kylmä, jätteen energiahyötykäyttö, biopolttoaineet, muut kiertotalouden ratkaisut sekä sähkönmyynti ja siihen liittyvät palvelut. Segmentillä on liiketoimintaa Pohjoismaissa, Baltiassa ja Puolassa [2].

Russia-segmentti koostuu sähkön ja lämmön tuotannosta ja myynnistä Venäjällä. Segmentti sisältää myös Fortumin yli 29 prosentin omistusosuuden TGC-1:stä. Osakkuus-yhtiö TGC-1 omistaa ja operoi vesi-lämpövoimaa Venäjän luoteisosassa, sekä omistaa Pietarin lämmönjakoverkon. Russia-segmentin sähkönmyynti vuonna 2016 oli 29,5 TWh ja lämmönmyynti 20,6 TWh [2].

Yrityksessä työskentelee noin 8 100 työntekijää Pohjoismaissa, Baltian maissa, Venäjällä, Puolassa ja Intiassa. Henkilöstö jakaantuu kuvaajan 2 mukaisesti neljälle eri segmentille [2].



Kuvaaja 2. Fortumin henkilöstö [2].

## 2.2 Loviisan ydinvoimalaitos

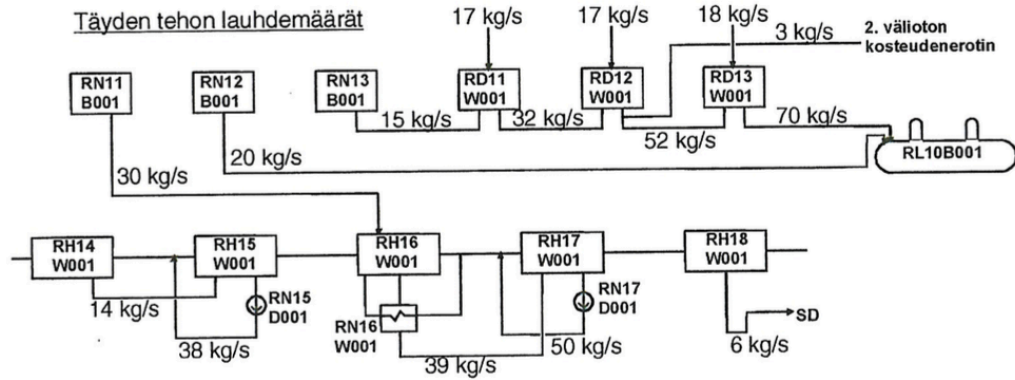
Fortumin Loviisan ydinvoimala sijaitsee Loviisan Hästholmenissa. Voimalaitoksessa on kaksi VVER-tyyppistä painevesireaktoria (PWR). Loviisan ydinvoimalaitos toteutettiin monikansallisena hankkeena. Neuvostoliitosta hankittiin reaktori, turbiini, generaattori ja muut pääkomponentit. Voimalaitoksen turvallisuusjärjestelmät, valvontajärjestelmät ja automaatiojärjestelmät ovat länsimaista alkuperää [3].

Loviisa 1 otettiin käyttöön vuonna 1977 ja Loviisa 2 vuonna 1980. Loviisa 1:n käyttö lupa on voimassa vuoteen 2027 ja Loviisa 2:n vuoteen 2030. Molempien yksiköiden kapasiteetti on 502 MW ja tuotanto vuonna 2016 oli yhteensä 8,33 TWh. Käyttökerroin Loviisan ydinvoimalalla on 91,1 prosenttia ja kansainvälisessä mittakaavassa se on maailman painevesilaitosten parhaimmista.

Voimalaitoksen tuotanto on noin 13 prosenttia Suomen sähköntuotannosta. Voimalaitoksella työskentelee vakituisesti noin 500 henkilöä ja 100 alihankkijaa [2];[3].

## 3 RN-sivulauhdejärjestelmä

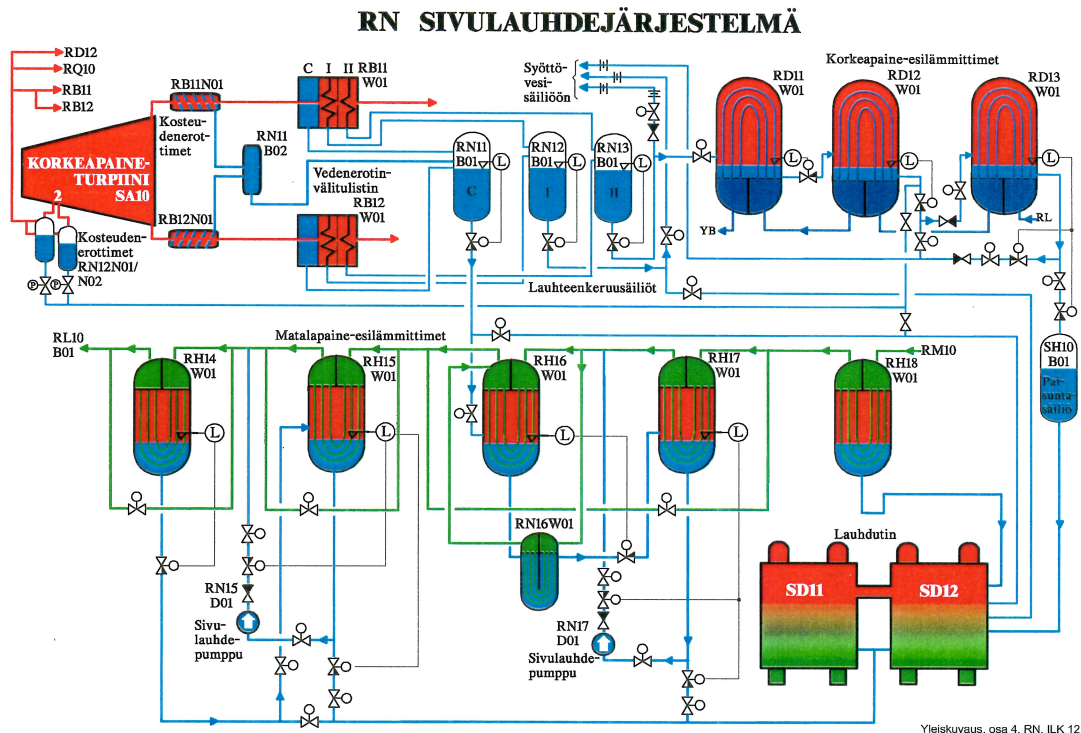
Turbiinikohtaisen sivulauhdejärjestelmän tehtävänä on palauttaa vedenerottimen vedet sekä välitulistimien ja esilämmittimien lämmityslauhteet takaisin pääprosessiin. Turbiinisyksikön termisen hyötysuhteen parantamiseksi lämpöä sisältävät lauhteet palautetaan pääprosessiin sellaisiin kohtiin, joissa lämpötila on lähellä palautettavan lauhteen lämpötilaa. Lauhteen palautus tapahtuu joko prosessipaineella tai lauhdepumpulla prosessipaineen ollessa riittämätön. Sivulauhteella on yleensä kaksi poistolinjaa: täyden tehon linja ja osatehon linja. Osateholla, jolloin prosessipaine on pienempi kuin täydellä teholla tai sivulauhdepumppu pienestä lauhdemäärästä johtuen seisoo, sivulauhteet johdetaan matalampaan vastapaineeseen. Listaksi osateholinja toimii prosessihäiriöissä ja huolto-korjauksissa varalinjana. Kuvassa 1 on esitetty täyden tehon lauhdemäärät [4].



Kuva 1. RN-järjestelmän täyden tehon lauhdemäärät [4].

Esilämmittimissä ja lauhteenkeruusäiliöissä ylläpidetään lauhtepintaa, joka estää höyryn pääsyn suoraan lauhdejärjestelmään ja edelleen lauhdetta vastaanottavaan järjestelmään. Lauhtepintaa säädetään pneumaattisilla pinnansäätöventtiileillä. Pinnansäätöventtiileinä toimivat Metson Jamesbury®-palloventtiilit. Lauhteen poiston tapahtuessa prosessipaineella käytetään pinnansäätöä [4].

Turbiinikohtainen RN-järjestelmä jakautuu kolmeen osajärjestelmään, lauhdetta poistaviin pääjärjestelmiin RB, RD ja RH. Järjestelmän prosessikaavio on esitetty kuvassa 2.



Yleiskuvaus, osa 4, RN, ILK 12.3.1999

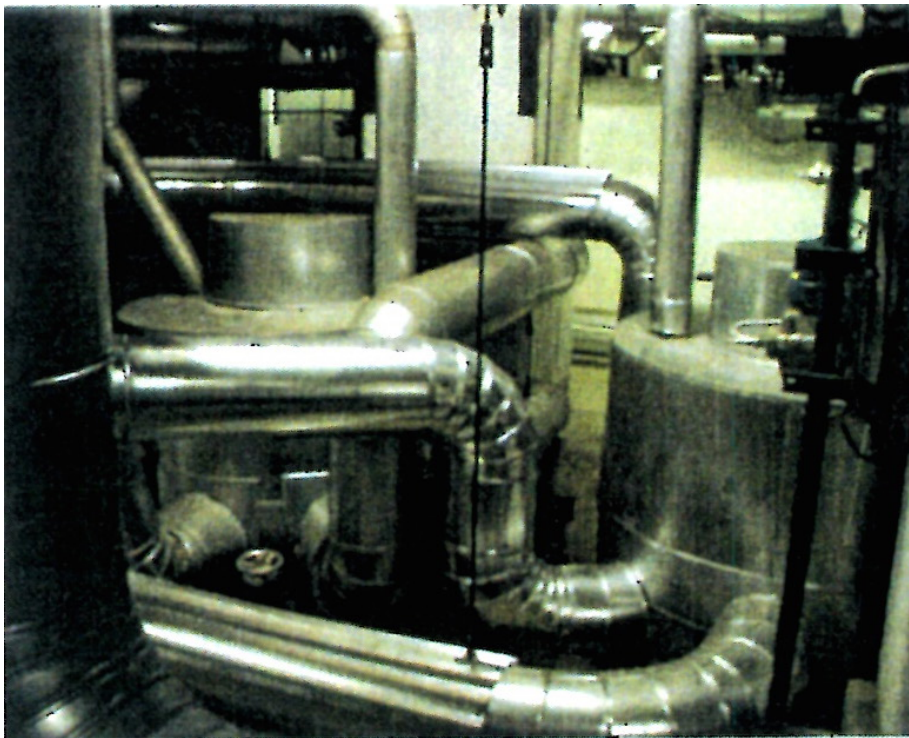
Kuva 2. RN-sivulauhdejärjestelmän prosessikaavio [4].



Vedenerotustulistimien (RB) lauhteet johdetaan erillisiin lauhteenkeruusäiliöihin RN11-13B01. Vedenerotinosan ja korkeapaineturbiinin alivirtausputkiston kosteudenerottimien lauhteet johdetaan RN11B01- säiliöön. Siitä ne edelleen johdetaan normaalikytkennässä matalapaine-esilämmittimeen TH16W01 ja muulloin suoraan lauhduttimeen [4].

Ensimmäisen tulistusvaiheen lauhteet johdetaan RN12B01-säiliöön, siitä edelleen normaalikytkennässä syöttövesisäiliöön ja muulloin suoraan lauhduttimeen. Syöttövesisäiliönlinjan kuristin estää kuuman lauhteen höyrystymisen putkistossa [4].

Toisen tulistusvaiheen lauhteet johdetaan RN13B01-säiliöön. Siitä ne johdetaan edelleen normaalikytkennässä RD11W01-korkeapaine-esilämmittimeen ja muulloin syöttövesisäiliöön. Kuvassa 3 vasemmalla on RN12B01-lauhteenkeruusäiliö, jonka yhteydessä on pinnansäätöventtiili [4].



*Kuva 3. Vasemmalla lauhteenkeruusäiliö RN12B01 [4].*

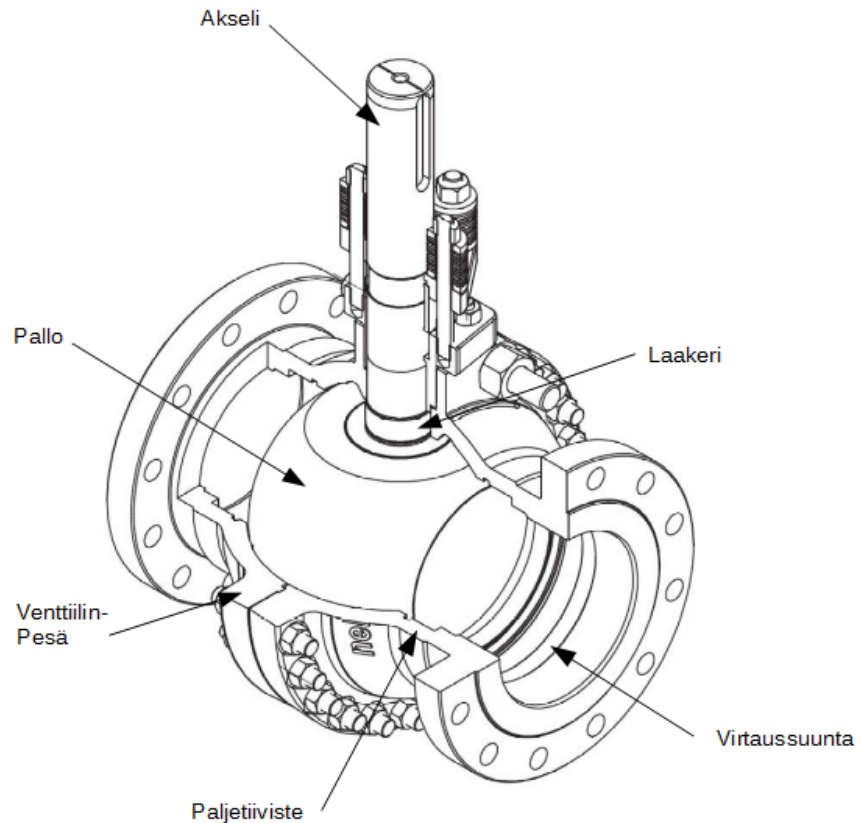
#### 4 Metson Jamesbury® -palloventtiili

Työssä tutkittiin lauhteenkeruusäiliön RN12B01 pinnansäätöventtiilin pallon tiivisteiden pinnoitetta. Pinnansäätöventtiilinä toimi Metson Jamesbury® D-sarjan palloventtiili.

Tutkittavan palloventtiilin tyyppimerkintä oli D2DY080AYY/03. Liitteen 1 mukaisesti voidaan määrittää seuraavat venttiilin tekniset tiedot:

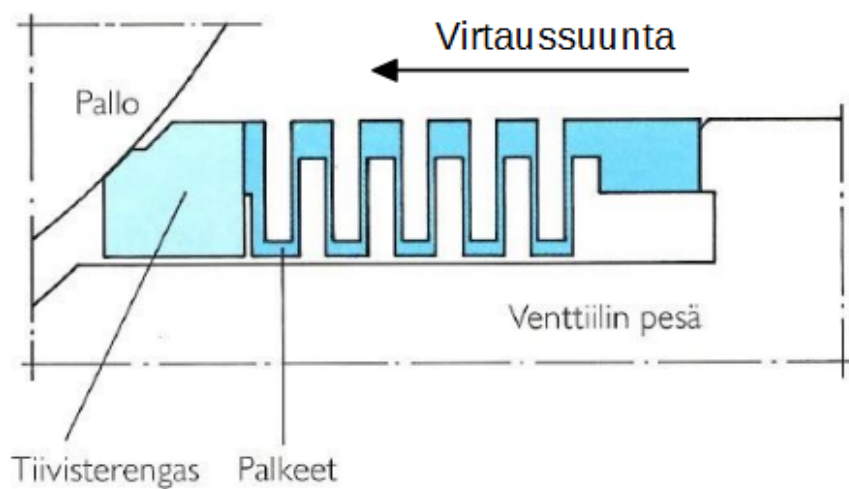
- täysiaukkoinen, laipallinen
- paineluokka ASME Class 300
- rakenne erikoinen
- koko DN 80
- pesän materiaali CF8M
- pallon materiaali erikoinen
- pallon tiivisteet paljettiiviste
- jakotasontiiviste grafiittia
- akselitiiviste grafiittia.

Säätöventtiili on tarkoitettu putkivirtauksen säätöön kuristamalla virtausta suljinelimen avulla. Suljinelin koostuu pallostasta ja akselistasta, jotka ovat tässä mallissa yhtä kappaletta. Tällöin varmistetaan välyksetön toiminta ilman hystereesi-ilmiön haittoja. Kokonaisuus on laakeroitu laakeriholkeilla pesien väliin. Kuvassa 4 on esitetty Metson Jamesbury® D-sarjan palloventtiili ja sen pääkomponentit [5];[6].



Kuva 4. Metson Jamesbury® D-sarjan palloventtiili [5].

Suljinelimen ja tiivsteen välinen kontakti on toteutettu metallisella tiivistyksellä. Tiivistyksen tiivistysperiaate on esitetty kuvassa 5. Tiivisterengasta kuormittaa palje jousen tavoin, mikä saa tiivisterengaan painumaan palloa vasten. Lopullinen tiivistyminen tapahtuu, kun sisäinen paine laajentaa paljetta aksiaalisesti ja työntää tiivistettä palloa vasten. Palje toimii sekä tiiviste- että jousielementtinä [5];[6].



Kuva 5. Palloventtiilin paljettiiviste [6].

## 5 Tiivistepintojen välinen kosketus

Tasainen kontakti venttiilin sulkuelimen ja tiivisteiden välillä on tärkeä. Sillä vältetään pistemäisten kuormitusten aiheuttamilta vaurioilta. Kuormitusolosuhteet, käytetyt pinnoitteet, sulkuelimen geometria ja pinnankarheus vaikuttavat tiivistepintojen väliseen kontaktiin. Nämä tekijät vaikuttavat lisäksi liikkuvien komponenttien väliseen kitkaan. Pintapaineella kuvataan tiivistepintojen puristuvuutta toisiaan vasten [7].

Pintapaine voidaan laskea kaavalla

$$q_c = \frac{F_N}{A} \quad (1)$$

missä on  $q_c$  = tiivistepintojen välinen pintapaine [MPa]

$F_N$  = normaalivoima [N]

$A$  = tiivisteiden pinta-ala [mm<sup>2</sup>].

Tiivistepintojen leveydellä on suuri vaikutus kontaktipinta-alaan. Kontaktipinta-alan kasvaessa tiivistepintojen välinen pintapaine vähenee. Pintapaineen alentuminen kasvattaa venttiilin sisäistä vuotoa [7].

## 6 Kuluminen

Kuluminen on seurausta tosiaan vastaan liikkuvista pinnoista. Kuluminen seurauksena kappaleen pinnalla tapahtuu materiaalihäviötä. Kuluminen mielletään yleensä vain haitalliseksi ilmiöksi. On myös tilanteita, jossa hallittua kulumista käytetään hyväksi, jolloin se edesauttaa konstruktion toimintaa [8].

Pallonventtiilin tiiviste sovitussläpätään palloa vasten timanttitahnaa käyttäen. Pintojen väliseen kosketukseen osallistuvat kuitenkin vain pintojen huippukohdat ja ne kantavat myös kuorman. Tällä toimenpiteellä pyritään tasoittamaan pinnankarheuden huiput ja näin laskemaan venttiilin sisäistä vuotoa.

## 6.1 Kulumiseen vaikuttavat tekijät

Kulumisen suuruuteen vaikuttavat kosketuspintojen rakenteet ja niiden pintakerrosten koostumus, ympäristöolosuhteet, lämpötila, liukumanopeus, kuormituksen suuruus ja sen tyyppi sekä materiaalin liukoisuus toisiinsa [9].

Kuluminen on voimakkainta sisäänajovaiheessa, jolloin kulumiskäyrä nousee voimakkaasti. Kosketuspintojen pinnankarkeuksien tasoituttua ja epäpuhtauksien poistuttua kosketuskohdasta saavutetaan tasapainotila. Tässä tilassa kuluminen on vakio. Sisäänajossa kuluminen on suoraan verrannollinen kuormitukseen ja kääntäen verrannollinen materiaalin lujuuteen nähden [8].

## 6.2 Kulumiskestävyys

Eri materiaalipareilla kulumiskestävyys on riippuvainen niiden kovuuksien suhteesta  $H_m/H_a$ . Kovuuksien suhteen laskiessa alle 0,8 on kyseessä voimakas abraasiokuluminen, jolloin kulumisnopeus on suuri.

- $H_m$  on abrasiivisen pinnan kovuus
- $H_a$  on metallin kovuus täysin muokkauslujittuneena

Kun tarkastellaan kovempaa metallia tai pehmeämpää abrasiivista pintaa vastakkain ja suhde ylittää arvon 0,8 pienenee kulumisnopeus ja siirrytään lievän abraasiokulumisen alueelle. Metallipinnan kuluminen loppuu kokonaan, kun  $H_m/H_a$ -suhde ylittää arvon 1. Tämä johtuu siitä, että epämetallisilla hionta-aineilla on yleensä pienempi kimmokerroin  $E$  kuin metalleilla, jolloin elastinen muodonmuutos sallii suuremman pinta-alan ja siten pienemmän paineen. Tällöin kovuuden suhde myötölujuuteen ( $H/\sigma_o$ ) jää myös pienemmäksi. Tästä voidaan päätellä, että abrasiivinen kulumiskestävyys riippuu erityisesti lujuudesta ja kimmomoduulista [8].

### 6.3 Materiaalin valitseminen

Valittaessa materiaalia abrasiiviseen kohteeseen on selvitettävä materiaalin riittävä myötölujuus kuormitukseen nähden. Sen jälkeen valitaan materiaali, jonka  $E/\sigma_0$ -suhde on mahdollisimman pieni. Materiaalia valittaessa on muistettava liukumisesta johtuva lämpötilan nousu kosketuskohdassa ja siitä johtuva lujuuden heikkenemien.

Suuren kuormituksen tapauksissa ovat keraamiset materiaalit käyttökelpoisia. Niiden haittana on kuitenkin hauraus. Seostamalla ja eri stabilointiaineilla on pyritty parantamaan konstruktiokeraamien sitkeyttä [8].

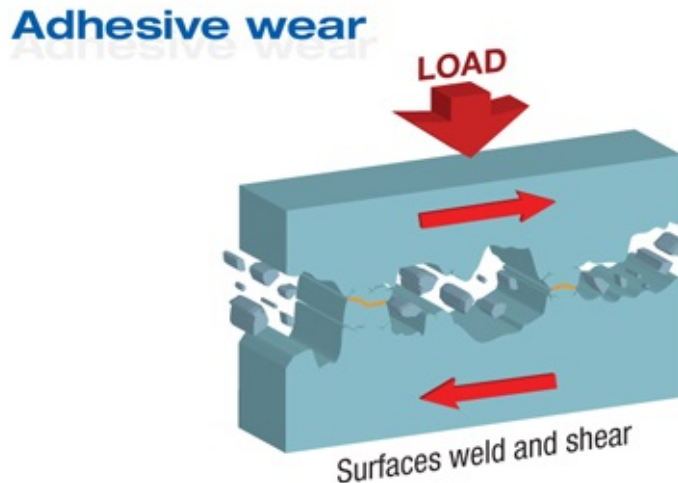
### 6.4 Adhesiivinen kuluminen

Adhesiivisesta kulumisesta käytetään Suomen kielen kirjallisuudessa rinnakkaisnimitystä tartuntakuluminen. Adhesiivisesta liitoksesta käytetään toisinaan nimitystä kylmahitsautuminen.

Adhesiivinen kuluminen perustuu atomi- ja kitkaliitosten, sekä pinnan karkeiden ulokkeiden leikkautumiseen. Kuvassa 6 on esitetty adhesiivinen liitos, jossa kahden pinnan liukuessa toisiaan vasten pinnankarkeuksien huiput tarttuvat toisiinsa kiinni atomisidosten ja kitkalämmön vaikutuksesta syntyvien kitkaliitoksien avulla. Adhesiivisten liitosten syntyessä peräjälkeen samassa kohtaa syntyy kitkalämpöä. Materiaalin kovuus laskee yleisesti lämpötilan noustessa. Pintojen kosketuskohdassa lämpötila voi nousta hyvinkin korkeaksi ja tahmutuminen tapahtuukin siten oletettua aikaisemmin ja voimakkaammin.

Kulumisen laajuus riippuu siitä, mistä kohtaa liitos repeää. Liitoksen revetessä alkupe-  
räisestä pintojen rajapinnasta kulumispartikkeleita ei synny. Liitoksen revetessä muualta, siirtyy materiaalia pinnalta toiselle ja lopulta muodostuu myös irrallisia kulumispartikkeleita. Kulumispartikkelit kiihdyttävät kulumista ja vaikuttavat kokonaistapahtumaan. Puhdas adhesiivinen kuluminen toimii usein kokonaisvaltaisen kulumisen alkuunpanijana, joten sitä ei välttämättä esiinny käytännössä kovin pitkää ajanjaksoa [8];[9].

Adhesiivista kulumista esiintyy yleensä pinnoissa, joista puuttuu riittävä voitelu. Voitelu pitää pinnat erillään toisistaan. Kuorman kasvaessa tai helposti leikkaantuissa materiaaleissa koko pintakerros voi plastisoitua ja pinnat tahmautuvat tosiinsa. Tällöin kulumisnopeus kasvaa jyrkästi. Liikkeen pysähtyessä tahmaantumisen takia puhutaan kiinnileikkautumisesta. Oikealla materiaalivalinnalla ja voitelulla estetään kiinnileikkautuminen [8].



Kuva 6. Adhesiivinen kuluminen [10].

## 6.5 Abrasiivinen kuluminen

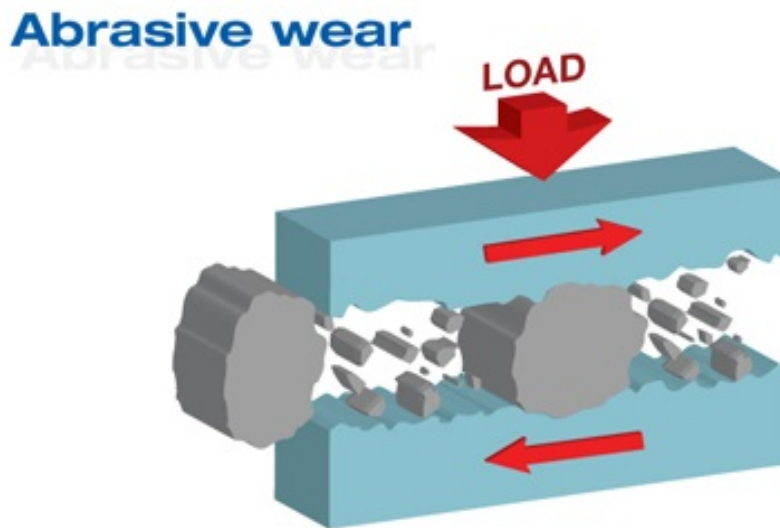
Kun kahden tosiaan vasten liukuvan pinnan välissä on molempia pintoja kovempaa materiaalia, joka uurtaa molempia pintoja, puhutaan kolmen kappaleen abrasiivisesta kulumisesta. Usein käytännössä abrasiivinen kuluminen alkaa kahden kappaleen kulumisena kehittyen kolmen kappaleen abrasiiviseksi kulumiseksi. Kuvassa 7 näkyy abrasiivista kulumista, jossa pintojen välissä olevat kulumispartikkelit (irronneet jommastakummasta pinnasta) ovat esim. muokkauslujittumisen takia kovettuneet. Samalla tavalla myös adhesiivinen kuluminen voi kehittyä kolmen kappaleen abrasiiviseksi kulumismekanismitiksi.

Abrasiivinen kuluminen (vastinpinta tai kolmen kappaleen partikkelit irrottavat materiaalia pinnasta) voi tapahtua periaatteessa kolmella eri mekanismilla:

1. kyntämällä
2. leikkautumalla
3. hauraasti murtumalla.

Abrasiivinen terävyys tai kuluttavan vastinpinnan ulokkeiden jyrkkyys vaikuttaa siihen, muodostuuko ura leikkautumalla vai kyntämällä. Jyrkkyyden ollessa suuri on leikkaantuminen voimakkaampaa ja pienissä jyrkkyyksissä plastinen defermaatio lisääntyy ja kyntäminen on todennäköisempää.

Hauraista materiaaleista kulumispartikkelit irtoavat hauraasti murtumalla. Näin käy etenkin silloin, kun kuluvaan pintaan kohdistuu iskumaista kuormitusta ja materiaali on haurauden lisäksi jäykkää. Paikalliset jännityshuiput kasvavat niin suuriksi, että suuri kovuuskaan ei pysty estämään murtumista.



Kuva 7. Abrasiivinen kuluminen [10].



## 7 Mittausmenetelmät

### 7.1 Pyyhkäisymikroskooppi (SEM)

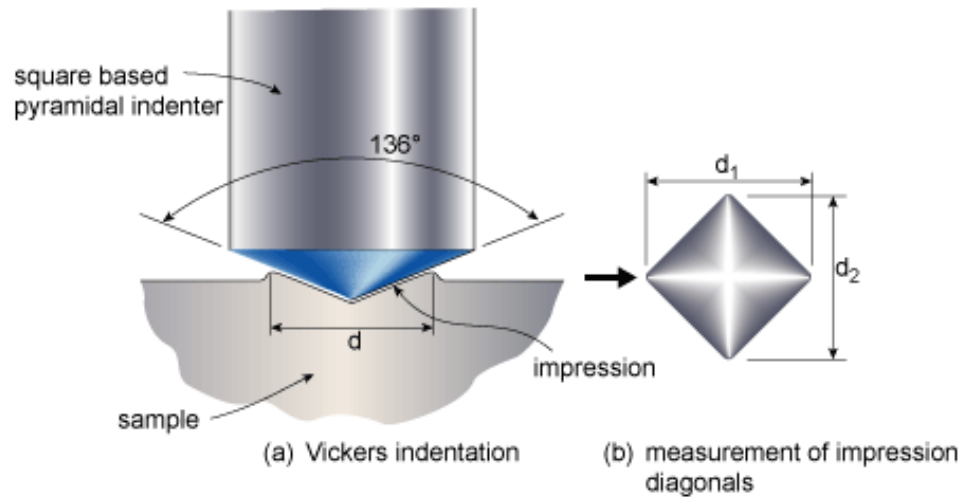
Pyyhkäisymikroskoopilla päästään erinomaisesti tarkastelemaan pinnan erilaisia muotoja ja rakenteita. Erotuskykynsä ja syvyytarkkuuden ansiosta se soveltuu erinomaisesti pienpiirteisten rakenne yksityiskohtien tutkimiseen. Yksityiskohtainen pintakuva syntyy piste pisteeltä kapean elektronisuihkun pyyhkiessä näytteen pintaa edestakaisin.

SEM-mikroskooppi käyttää elektronitykin tuottamaa elektronisuihkua, joka ohjataan sähkömagneettisilla linseillä näytteen pintaan. SEM ei tuota oikeaa kuvaa, vaan elektronisen kuvan tietokoneen näytölle [11];[12].

SEM on varustettu myös alkuainepitoisuuksien mittaamisen mahdollistavalla röntgenspektrometrillä. Alkuaineanalyysointori eli EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) pystyy mittaamaan hyvinkin pienistä näytteistä sen suhteellisen ainepitoisuuden. Analyysointori käyttää hyväkseen SEM-kuvauksen elektronien pommituksessa irtoavaa röntgensäteilyä [11].

### 7.2 Vickers-kovuuskoe

Vickers-kovuuskokeen avulla selvitetään, kuinka kovaa tai pehmeää aine on kuva 8. Aineen kovuudella tarkoitetaan sen kykyä vastustaa vieraiden esineiden tunkeutumista siihen. Mitä pehmeämpi aine on, sitä helpommin siihen muodostuu jälki. Vickers-kovuuskokeessa kappaleeseen painetaan standardin mukainen timanttipyramidi määrättyllä kuormituksella. Kuormituksen jälkeen katsotaan mikroskooppia apuna käyttäen suurenos painumasta ja mitataan sen lävistäjä. Vickers-kovuus saadaan laskettua kaavan 2 mukaan [13].



Kuva 8. Vickers-kovuus [14].

$$HV = \frac{\text{Kuormitus}}{\text{Painuman pinta-ala}} \quad (2)$$

$$= \frac{\beta * 2 * F * \sin \alpha^\circ / 2}{d^2}$$

$$= \frac{0,102 * 2 * F * \sin 136^\circ / 2}{d^2}$$

$$= 0,1891 \frac{F}{d^2}$$

missä  $F$  = kuormitus [N]

$d$  = lävistäjien  $d_1$  ja  $d_2$  aritmeettinen keskiarvo [mm]

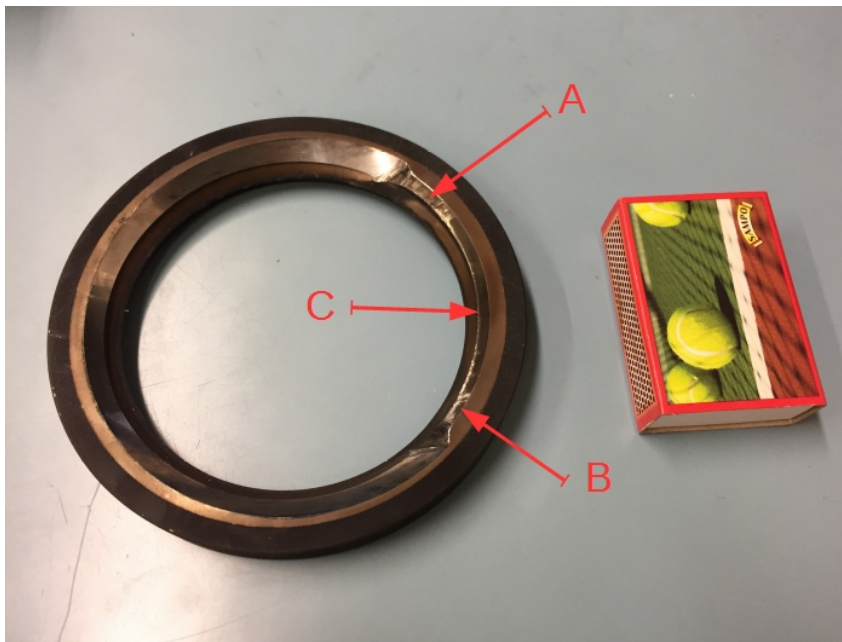
$\alpha$  = painimen vastakkaisten sivutahkojen välinen kulma on  $136^\circ$

$\beta$  = Kerroin  $0,102 \approx 1/9,81$  johtuu yksikön kilopondin korvaamisesta yksiköllä newton.

## 8 Tutkimuksen suorittaminen ja tulokset

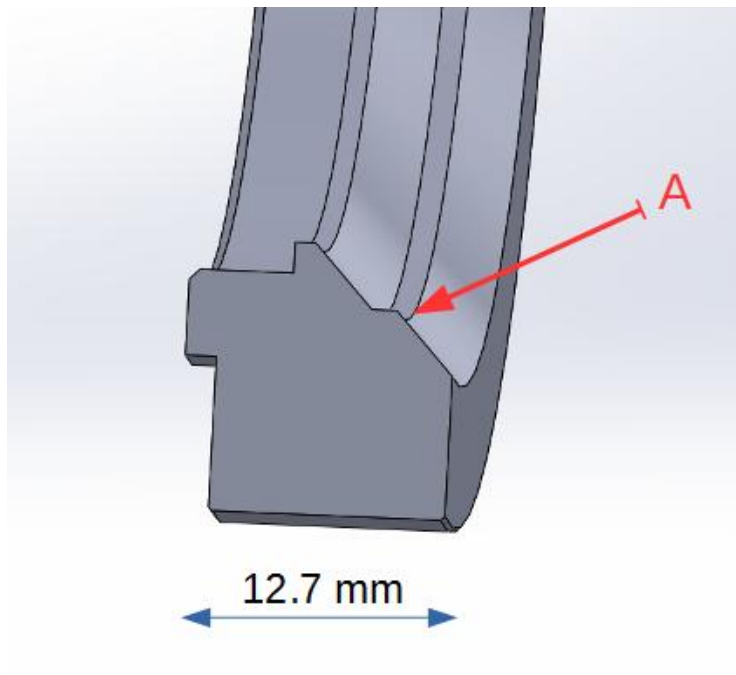
### 8.1 Silmämääräinen tarkastelu

Silmämääräisessä tarkastelussa havaittiin pallon tiivisteeseen erittäin voimakkaasti. Tiivisteeseen pinnasta on hävinnyt noin 2 mm materiaalia 70 prosentin alueelta. Tiivisteessä ei havaita silmämääräisesti halkeamia tai murtumia. (Kuva 9.)



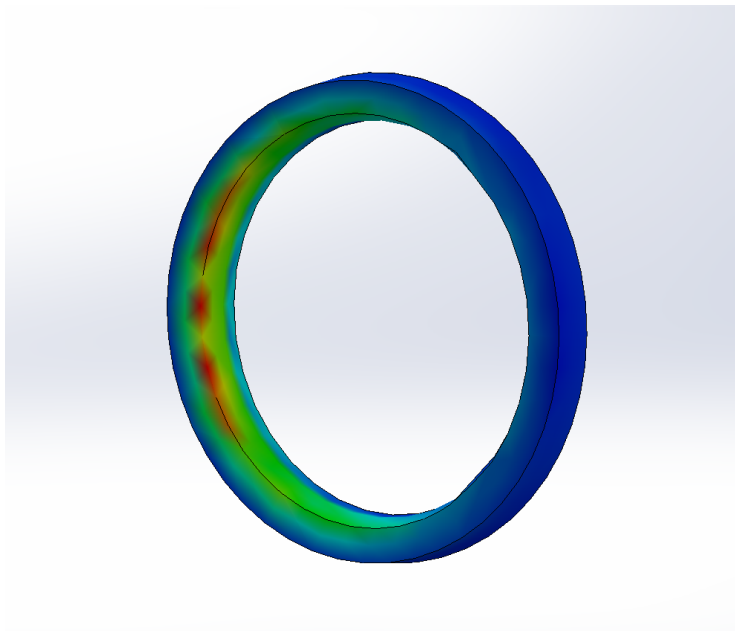
*Kuva 9. Palloventtiilin pallon tiiviste.*

Tiiviste oli mitoiltaan 107,0x80,0x12,7 mm, ja sen poikkileikkaus esitetään kuvassa 10. Silmämääräisessä tarkastelussa havaitaan pallon ja tiivisteeseen välisen kosketuspinnan olevan kohdassa A.



Kuva 10. Pallon tiivisteiden poikkileikkaus.

Näin ollen venttiilin ollessa 60 % auki pintapaine jakaantuu tiivistepinnalle kuvan 11 tavoin. Kuva on suuntaa antava, koska tarkkoja pallon mittoja ei ollut saatavilla. Myös palkeen omaa jousikuormaa ja venttiilin sisäisen paineen vaikutusta palkeeseen on vaikea määrittää venttiilin ollessa osittain auki.



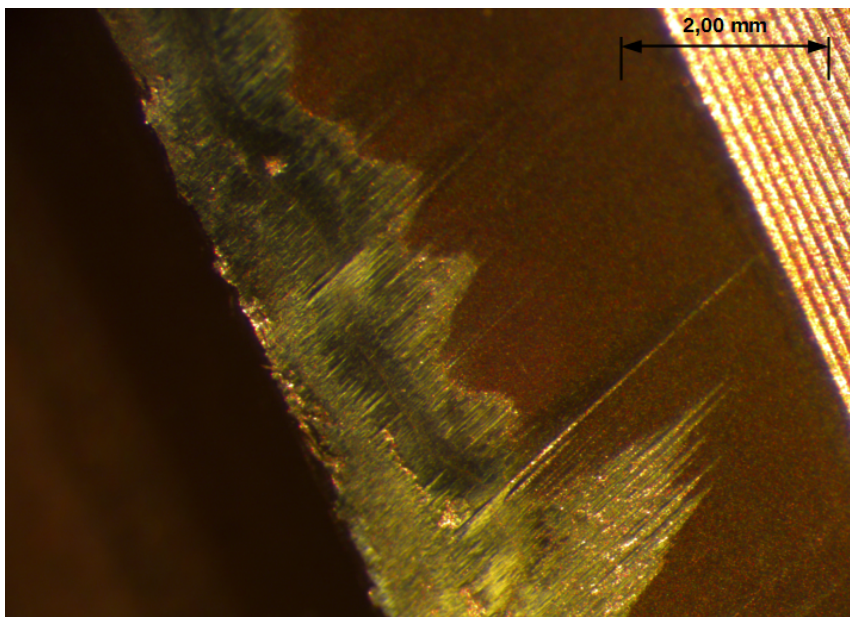
Kuva 11. Pallon tiivisteeseen kohdistuva pintapaine.

## 8.2 Pinnoitteen mikrorakenteen tarkastelu

Kulumispintaa tarkasteltiin Leica-MZ8 digitaalisella mikroskoopilla. Tämän toimenpiteen voi suorittaa rakennetta tuhoamatta. Tarkastelussa havaittiin tiivistepinnan sisäreunassa adhesiivista kulumista. Kapea kontaktipinta nostaa pintapainetta.

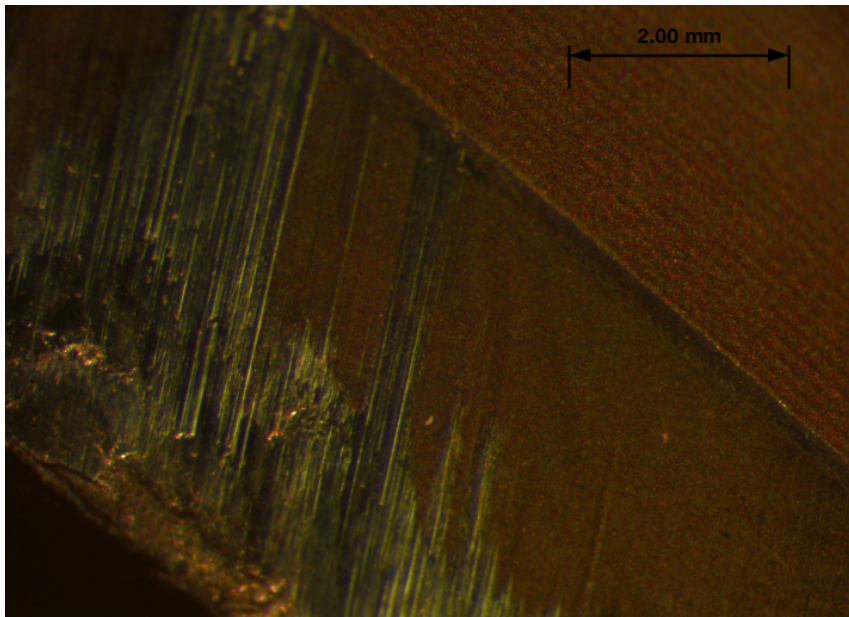
Pinnankarkeuden huippujen hangatessa tosiaan vasten, muuttuu osa niiden energiasta lämmöksi. Pinnankarkeuden huipuilla voi olla jopa tuhansia lämpöasteita. Lämpösokki kestää noin 0,0004 sekuntia [8].

Suuresta pintapaineesta ja lämmöstä johtuen laajenevat pinnankarkeuden huippujen alla olevat plastisoituneet alueet niin paljon, että ne yhtyvät toisiinsa. Tällöin pinnat tahmaantuvat toisiinsa. Kuvassa 12 esiintyy tahmaantumista tiivisteen sisäreunassa. Kuva on tarkennus kuvan 9 kohdasta A. Venttiilin operoinnin jatkuessa kulumisnopeus kasvaa jyrkästi.



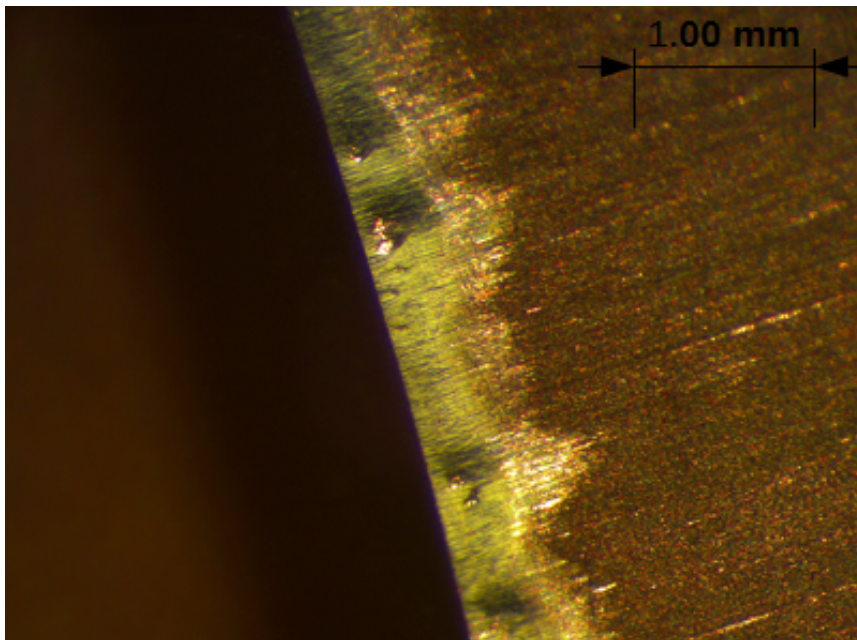
*Kuva 12. Pallon tiivisteiden kuluma.*

Kuva 13 on tarkennus kuvan 9 kohdasta B. Kuvan vasemmassa reunassa esiintyy tahmaantumista, jonka seurauksena pinnalta on irronnut kovia kulumispartikkeleita. Kulumispartikkelit kiihdyttävät kulumista ja kulumisen muuttuu kolmen partikkelin abrasiiviseksi kulumiseksi. Tiivisteiden pinnalla abrasiivinen kulumisen tapahtunut kyntämällä ja leikkaamalla.



*Kuva 13. Pallon tiivisteiden kuluma.*

Kuva 14 on tarkennus kuvan 9 kohdasta C. Kuva on pallon tiivisteiden ehjältä puolelta, joka altistuu rasitukselle ainoastaan venttiilin ollessa täysin kiinni. Kuvassa esiintyy pientä hankauksen jälkeä tästä johtuen. Tarkastelussa havaittiin myös ehjässä tiivistepinnassa huokosia muistuttavia reikiä.



*Kuva 14. Pallon tiivisteiden ehjä puoli.*

Kuvien perusteella oli syytä tutkia lähemmin pinnoitteen reunaa ja huokosia muistuttavia reikiä SEM:llä.

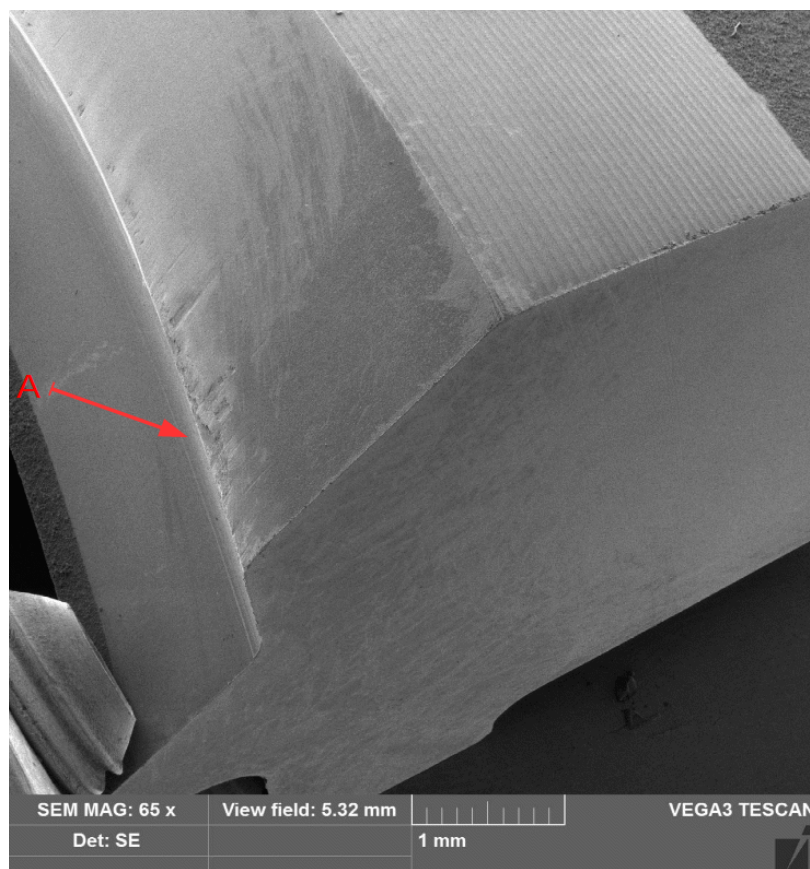


### 8.3 Pyyhkäisymikroskooppi (SEM)-analyysi

SEM-analyysi toteutettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun laboratoriossa projektiasiantuntija Oskari Rytin ohjaamana. Ennen SEM-analyysia kappaleesta leikattiin näytekappale Struers Discotom-laitetta käyttämällä. Leikkauksen jälkeen näytekappale puhdistettiin ultraäänipesurissa kolmella eri puhdistusaineella. Ensimmäisenä näytteestä poistettiin rasvanpoistoaineella rasva, minkä jälkeen rasvanpoistoaine poistettiin alkoholilla. Lopuksi pinta puhdistettiin tislatulla vedellä ja kuivattiin. On erittäin tärkeää, ettei näytekappaleeseen pääse epäpuhtauksia heikentämään SEM-analyysia ja lyhentämään laitteen käyttöikää.

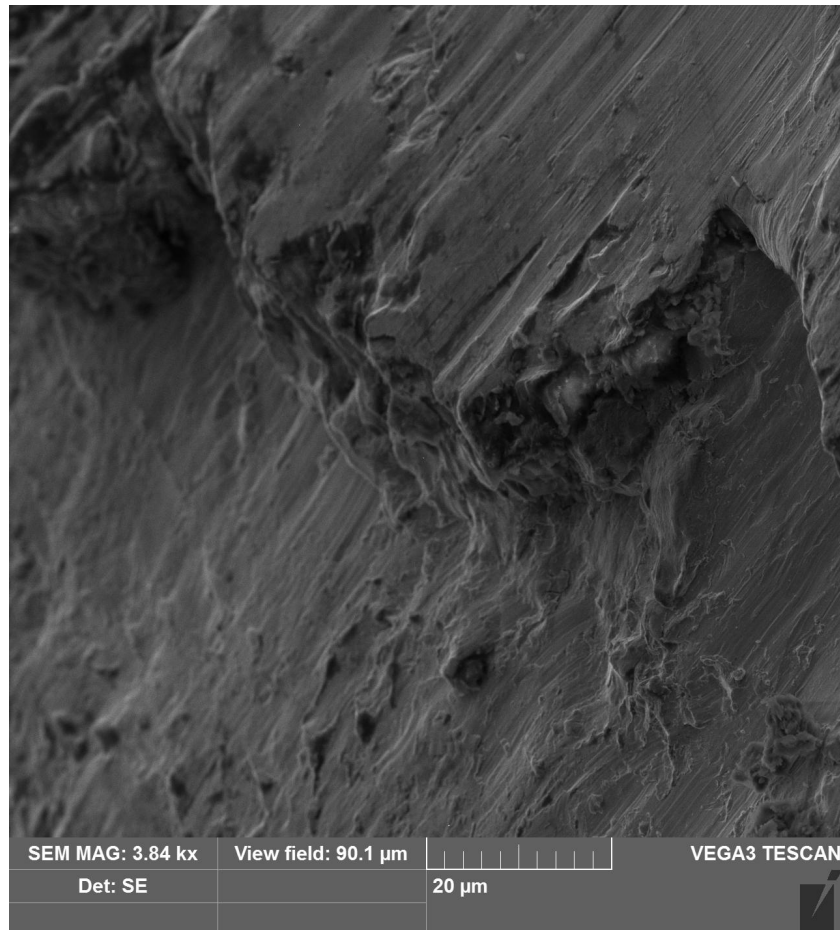
Alkuainepitoisuuksien mittauksen perusteella pystyttiin määrittelemään kuvan 14 huokosia muistuttavat pisteet hiili-epäpuhtauksiksi. Tarkastelussa päästiin lähemmäksi materiaalin rakennetta.

Kuvassa 15 on esitetty SEM:llä otettu kuva tiivisteiden reunaprofiilista. Kuluminen on alkanut kontaktipinnan sisäreunasta.



Kuva 15. SEM-kuva tiivisteiden reunaprofiilista.

Kuva 16 on tarkennus kuvan 15 kohdasta A. Pinnoite on lähtenyt kuvan vasemmalta puolelta. Pinnassa on syviä naarmuja. Naarmut ja rikkoutunut pinnoitteen reuna edistävät pinnoitteen kulumista.



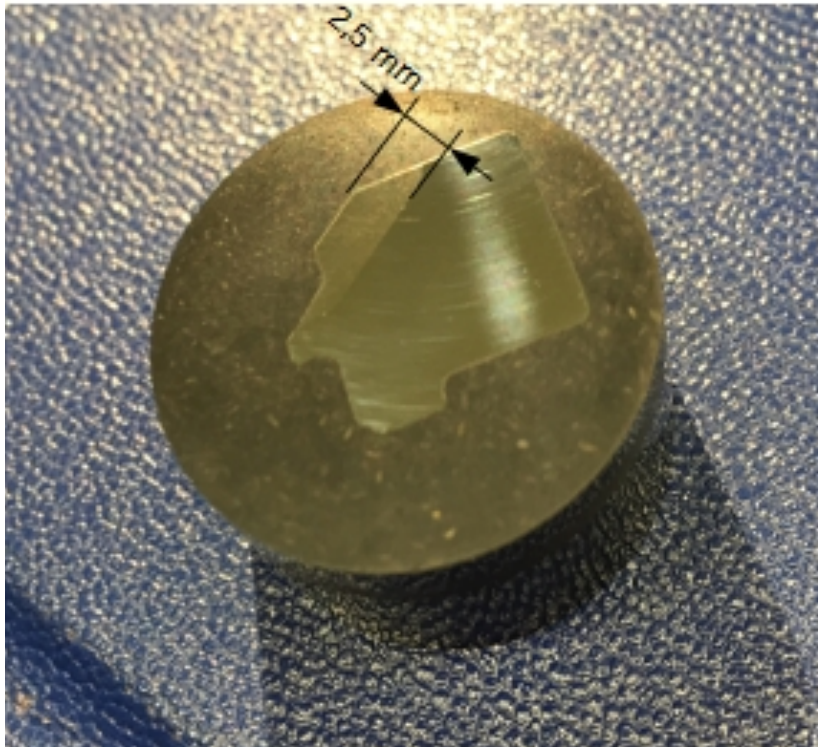
*Kuva 16. SEM-kuva pinnoitteen reunasta.*

#### 8.4 Pinnoitteen- ja perusaineen mikrorakenteen tarkempi tarkastelu

Mikrorakennetarkastelua varten kappaleesta leikattiin uusi näytepala. Näytepala valettiin Struers Citopress-valukonetta käyttäen muoviseen näytenappiin siten, että pallon tiivistepinnan poikkileikkaus jäi näkyviin. Näytenappi hiottiin Struers Tegramin-laitteella käyttäen hiomapapereita SIC 320, 800 ja 1000. Viimeistely suoritettiin mekaanisella kiillotuksella käyttäen DiaPro-timanttisuspensioita. Ennen seuraavaan hiontavaiheeseen siirtymistä on erittäin tärkeää, että näyte huuhdellaan vedellä. Näin estetään edellisestä hionnasta irronneiden partikkeleiden joutuminen uuteen työvaiheeseen.



Kuvassa 17 on valmis kuumavalettu näytenappi. Pinnoitteen ja perusaineen raja on havaittavissa kuvassa. Pinnoitteen paksuus on noin 2.5 mm.

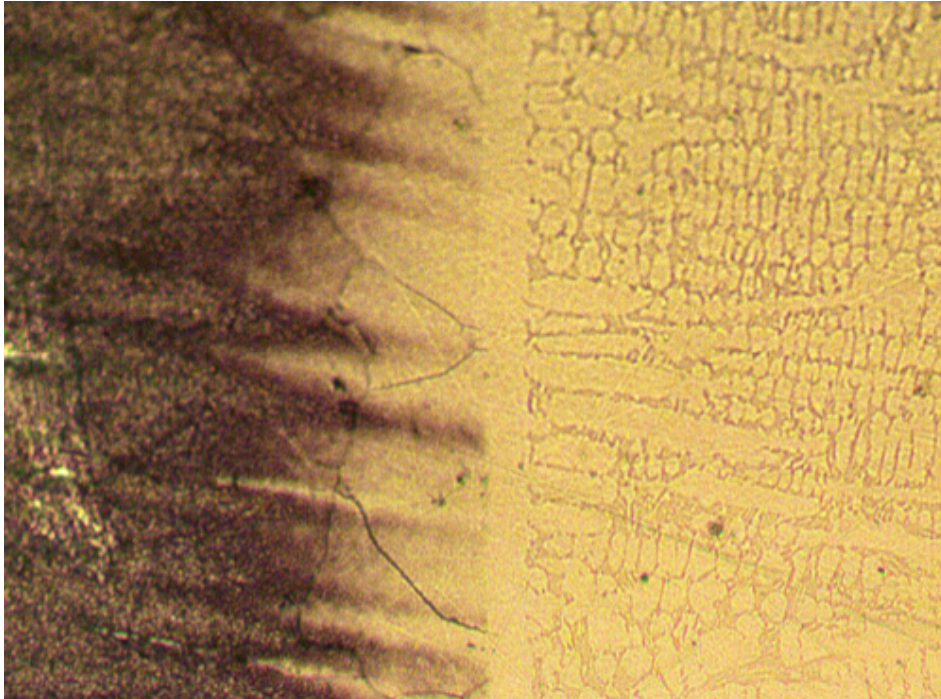


*Kuva 17. Kuumavalettu näytenappi.*

Mikrorakenteen esille saamiseksi näytekappaletta syövytettiin hapolla. Syövytyksellä saadaan pinnoitteen mikrorakenne esille. Happo sisälsi seuraavia yhdisteitä:

- kuparikloridi ( $\text{CuCl}_2$ )
- typpihappo ( $\text{HNO}_3$ )
- suolahappo ( $\text{HCl}$ )
- vesi ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Kuvassa 18 on esitetty pinnoitteen ja perusaineen mikrorakenne. Näytettä jouduttiin syövyttämään voimakkaasti, jotta saatiin pinnoitteen rakenne esille. Tästä johtuen vasemmalla perusaine tummui voimakkaasti. Perusaineen rakenne on austeniittinen, ja se on pehmeää, sitkeää ja muovautuvaa.



*Kuva 18. Perusaineen ja pinnoitteen mikrorakenne.*

Perusaineen ja pinnoitteen välillä on muutosvyöhyke. Sula-alueen perusteella voidaan todeta, että pinnoite on hitsattu perusaineeseen. Muutosvyöhyke on perusainetta ja pinnoitetta seostumana. Tällä alueella materiaalin ominaisuudet eivät ole vielä pinnoitteen kaltaisia. Pinnoitteen hitsaaminen perusaineeseen on onnistunut hyvin, eikä rakenteessa ole havaittavissa hitsausvirheitä. Hitsauksen jälkeisen pinnan hionta on suoritettu hyvin. Kappaletta on jäähdytetty tarpeeksi, eikä mikrorakenteessa ole havaittavissa rakenteellisia muutoksia. Oikealla puolella on havaittavissa pinnoitteen mikrorakenne, joka on stelliitille tyypillinen. Mikrorakenteessa esiintyy harmaita alueita, jotka ovat karbideja, ja vaaleat alueet ovat kobolttia.

## 8.5 Pinnoitteen kovuuden mittaus

Pinnoitteen kovuus mitattiin Struers Duranscan-laitteella. Laite mittaa pinnan kovuutta Vickers-menetelmällä. Kovuuden mittauksessa käytettiin samaa näytenappia, kuin mikrorakenne tarkastelussa. Kovuus mitattiin pinnoitteen viidestä eri kohdasta. Taulukossa 1 on esitetty lävistäjien pituudet millimetreinä ja kaavaa 2 käyttäen saatiin laskettua Vicker-kovuus jokaiselle mittaukselle. Saaduista kovuusmittauksista laskettiin keskiarvo pinnoitteen kovuudelle. Pinnoitteen Vickers-kovuus on 433 HV.

*Taulukko 1. Pinnoitteen Vickers-kovuus.*

Mittaus	Lävistäjä $d_1$ (mm)	Lävistäjä $d_2$ (mm)	Vickers-kovuus (HV)
Mittaus 1	143,31	145,40	445
Mittaus 2	145,40	146,45	435
Mittaus 3	145,40	146,50	435
Mittaus 4	147,49	148,54	423
Mittaus 5	145,41	148,54	429
Keskiarvo			433

## 8.6 Pinnoitteen materiaalin määrittäminen

Tiivisteiden perusaineen ja pinnoitteen materiaalipitoisuuksia mitattiin Oxford Instruments mPulse<sup>TM</sup>-analysaattorilla. Mittauksessa pulssimainen laser sulattaa materiaalin pintaa, jolloin laitteen spektrometri havaitsee plasman valosta eri alkuaineiden aallonpituudet ja mittaa niiden intensiteetit. Analysaattorin avulla voidaan mitata kappaleen materiaalipitoisuuksia lähes rikkomatta kappaletta. Kappaleen pintaan jää noin 3 - 4 mm:n pituinen laserviilto [15].

Taulukossa 2 on esitetty analysaattorilla saadut tulokset. Tulokset on annettu prosentteina. Laite tunnisti perusaineen materiaaliksi kauppalaadun 316L. Pinnoitteen osalta laite ei tunnistanut materiaalin kaupallista laatua. Pinnoite sisältää enimmäkseen kobolttia, johon on seostettu kromia (Cr), rautaa (Fe), volframia (W) ja molybdeenia (Mo).

*Taulukko 2. Materiaalin määrittäminen.*

Materiaali	Perusaine	Pinnoite
Co	0	47.20
Cr	17.87	32.99
Fe	65.60	7.77
W	0	7.72
Ni	11.72	2.93
Si	0.42	0.52
Mo	2.19	0.43
Mn	1.83	0.40
Cu	0.28	0

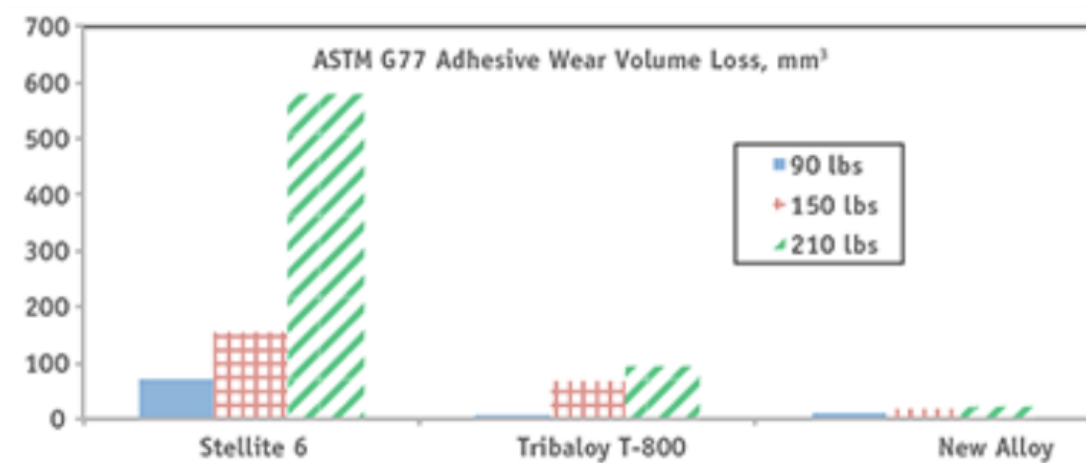
Verrattaessa saatuja tuloksia pinnoitevalmistajan Kennametal taulukkoon (liite 2) voidaan todeta, että materiaali on Stellite™ 6. Se on yleisesti käytetty pinnoite teollisuudessa, ja se soveltuu kohteisiin, joissa esiintyy mekaanista kulumista. Materiaali kestää erinomaisesti korkeita lämpötiloja ja sen korroosionkestävyys on huippuluokkaa.

## 9 Vaihtoehtoiset pinnoitteet

### 9.1 Tribaloy T-800™

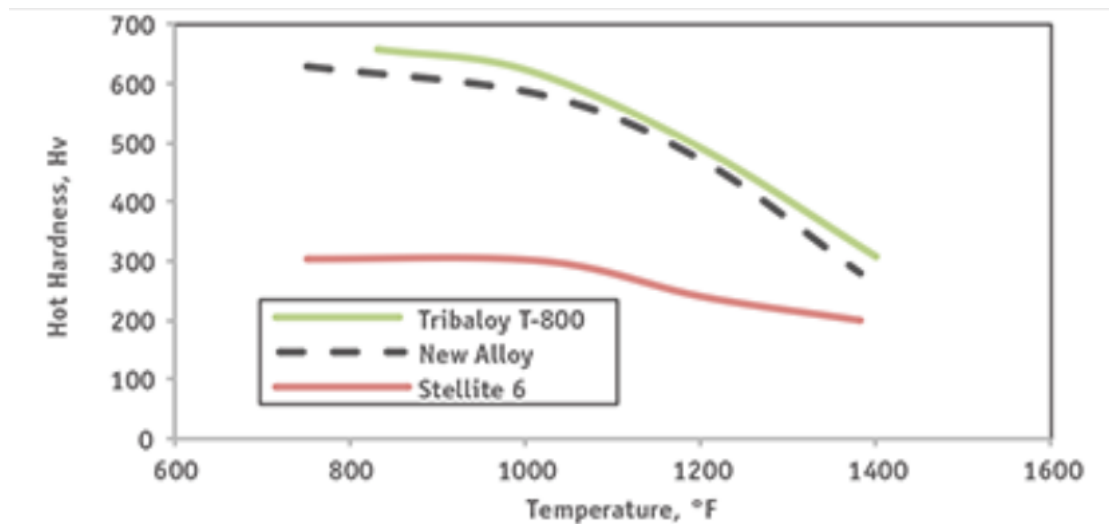
Tribaloy T-800™ sisältää pääosin kobolttia (Co), johon on seostettu kromia (Cr) ja molybdeenia (Mo). Se pysyy stabiilina aina 1 230 °C lämpötilaan asti. Tribaloy T-800™:n sulamispiste on 40 °C korkeampi kuin Stellite 6™:n. Korkean molybdeenin ansiosta Tribaloy T-800™ soveltuu kohteisiin, joissa pintojen välistä voitelua ei voida toteuttaa. Tämän ominaisuuden ansiosta Tribaloy-T800™:aa käytetään adhesiivisissa kulumiskoh-teissa. Pinnoitteella on erinomainen korroosion ja kulumisen kestävyys [16].

Kuvassa 19 on esitetty Tribaloy T-800™- ja Stellite 6™-pinnoitteiden kulumiskestävyyttä. Kulumiskokeen tuloksista havaitaan Stellite 6™-pinnoitteen menettäneen materiaalia huomattavasti enemmän, kuin Tribaloy T-800™ eri kuormitusolosuhteissa. Kuormituksen ollessa 78,40 kg Stellite 6™-pinnoitteesta kuluu materiaalia 580 mm<sup>3</sup>, kun taas samassa kuormitusolosuhteessa ja kuormitusajassa Tribaloy T-800™-pinnoitteesta kuluu 100 mm<sup>3</sup>. Tribaloy T-800™ kestää adhessiivista kulumista lähes kuusi kertaa paremmin, kuin Stellite 6™-pinnoite [17].



Kuva 19. Pinnoitteiden kulumiskestävyys [17].

Tribaloy T-800™- ja Stellite 6™-pinnoitteiden kovuutta eri lämpötiloissa on esitetty kuvassa 20. Stellite 6™-pinnoitteen kovuus lämpötilassa 430 °C on 300 HV. Samassa lämpötilassa Tribaloy T-800™-pinnoitteella saavutetaan 660 HV:n kovuus. Tribaloy T-800™-pinnoite on siis kaksi kertaa kovempaa kuin Stellite 6™.



Kuva 20. Pinnoitteiden kovuus. [17]

Tyypillisiä käyttökohteita Tribaloy T-800™-pinnoitteelle ovat palloventtiilien pallot ja niiden tiivisteet, tulpaventtiilin tulppa sekä kiilaluisti- ja läppäventtiilien pitopinnot.

Hitsattaessa pinnoitteen perusaineeseen käytetään TIG- ja plasmahitsausta. Tribaloy T-800™ on haurasta, ja hitsattavuus on huono. Hitsauksen jälkeen liian nopeasta jäähdytyksestä johtuen pinnoite lohkeilee helposti [17].

## 9.2 Kromioksidi

Tunnetuimmat kromioksidit ovat heksagonaalinen  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ja tetragonaalinen  $\text{CrO}_2$ . Kromioksidi on p-tyyppin puolijohde, ja se tunnetaan yleisesti ruostumattomien terästen korroosionkeston yhteydestä. Kromioksidipinnoite on erittäin kova ja kulutusta kestävä. Ominaisista pinnoitteelle on alhainen huokoisuus ja kitkakerroin, sekä pinnan hyvä viimeisteltävyys. Kromioksidilla ei esiinny epästabiileja faaseja kuten alumiinioksidilla. Konstruktivistisista kromioksidia ei yleisesti pidetä hyvin korroosiota kestävässä verrattuna muihin konstruktivisiin keraameihin. Sillä on taipumus pelkistyä helposti vetykaasussa, eikä se sovellu kosketuksiin happojen tai emästen kanssa [18].

Kromioksidi on kovin termisesti ruiskutettavista pinnoitteista. Ruiskutusmenetelmä ja pinnoitusjauhe vaikuttavat voimakkaasti pinnoitteen kovuuteen. Kromioksidipinnoitteen kovuus voi olla jopa HV 1890 ruiskutettuna suurenergiaplasamalla [9];[18].

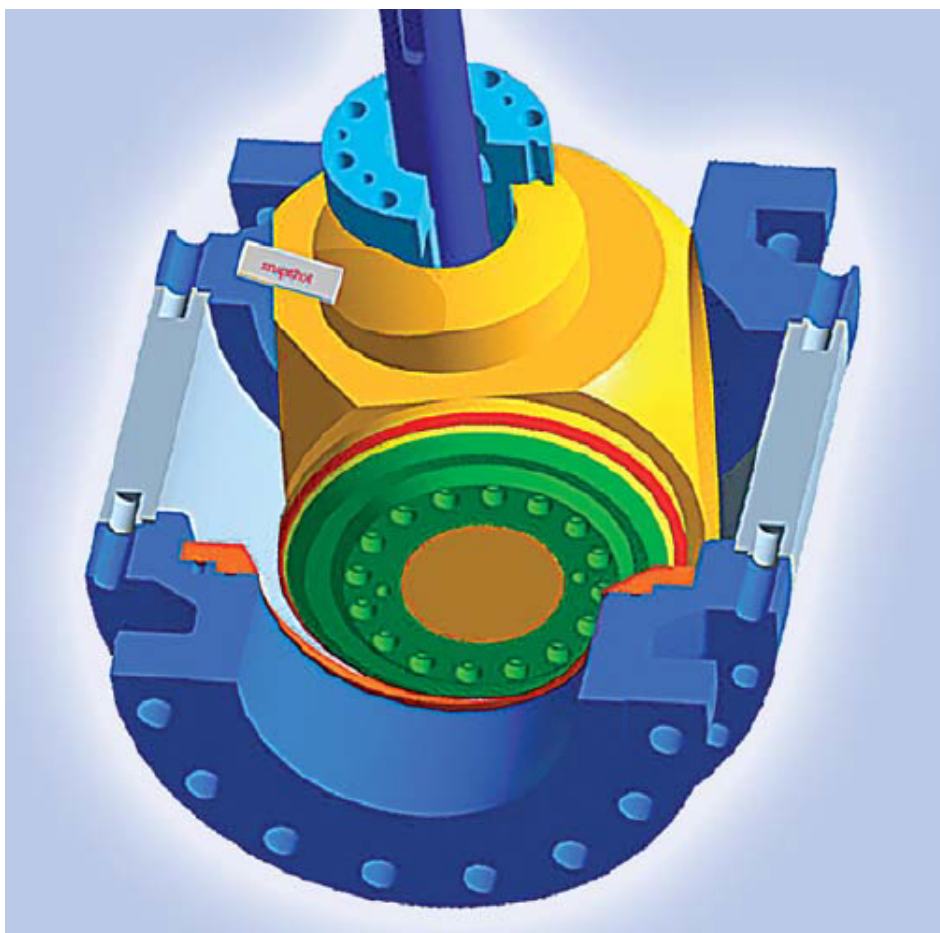
Ruiskutusmenetelmällä on myös suuri vaikutus pinnoitteen kulumiseen. VTT:n tutkimuksen mukaan HVOF-ruiskutusmenetelmällä (High Velocity Oxy-Fuel) tehty pinnoite on ylivoimaisesti kestävyydeltään parempi, kuin liekki- tai plasmaruiskutuksella tehty [18].



## 10 Vaihtoehtoiset venttiilityypit kohteeseen

Konospha-palloventtiilissä esiintyvät pallo- ja läppäventtiilin hyvät ominaisuudet. Lämpäventtiilin tavoin venttiilin pitopinnat koskettavat toisiaan ainoastaan venttiilin ollessa kiinni asennossa. Sen takia sitä kutsutaan non-contact-palloventtiiliksi. Venttiilin operoinnista ei aiheudu pitopintojen kulumista perinteiseen palloventtiilin tavoin.

Kuvassa 21 on esitetty Konospha-palloventtiilin rakenne. Pallon pitopintana toimii vaihdettava kartiotiiviste. Kulunut tiiviste on myös edullisempi vaihtaa, kuin koko palloelementti [19].



Kuva 21. Konospha-palloventtiili. [19]



## 11 Päätelmät

Palloventtiilin pallon tiivisteessä havaittiin heti voimakasta kulumista. Pinnoitteesta oli kulunut noin 2 mm syvyydeltä materiaalia pois osasta tiivistepintaa. Tiivisteeseen pintaan syntyy 2 mm pykälä ja venttiiliä operoitaessa kiinni päin sulkuelimen virtausaukko takeruu pykälään. Tiivisteeseen takana oleva palje joustaa sen verran, että tiiviste perääntyy ja suljinelin pääsee kääntymään kiinni-asentoon. Venttiilissä esiintyy tässä vaiheessa suurta sisäistä vuotoa, tiivisteeseen pinnan epätasaisuudesta johtuen. Tästä vielä suurempi kulumisen voi aiheuttaa, ettei venttiiliä voida operoida kiinni ja se jää osittain auki-asentoon.

Tiivisteeseen pinnassa havaittiin mikroskooppitarkastelussa adhesiivista kulumista. Pinnat olivat myös tahmaantuneet joistain kohdin johtuen suuresta pintapaineesta ja lämmöstä. Pinnoitetta myös rasittaa voimakkaasti venttiilin jatkuva operoiminen. Tästä johtuen pinnalta on irronnut muokkauslujittumisen takia kovettuneita partikkeleita, jotka aiheuttavat pinnalla abrasivista kulumista. Abrasiivinen kulumisen esiintyy pinnalla naarmuina, jotka ovat syntyneet kyntämällä ja leikkaamalla.

Pinnoite vastasi ominaisuuksiltaan pinnoitevalmistajan antamia arvoja. Voidaan todeta, että pinnoite on liitetty onnistuneesti perusaineeseen, eikä tiivisteeseen hionnassa lämpötila ole noussut liian korkeaksi heikentäen materiaalinominaisuuksia.

Pinnoitevaihtoehtoja on markkinoilla paljon. Venttiilin valmistajat ovat tutkineet pinnoitteen kestävyyskykyä, ja niistä on saatavilla kohtuullisesti tietoa.

Venttiiliin teetetyt kromioksidi- ja Tribaloy T-800<sup>TM</sup>-erikoispinnoitteet ovat kallis vaihtoehto, johtuen pienistä tuotantomääristä, pinnoitusmenetelmästä ja kalliista pinnoitemateriaalista. Kromioksidi- ja TribaloyT-800<sup>TM</sup>-pinnoitteet ovat haurautensa lisäksi myös jäykkiä. Vaarana on paikallisten jännityshuippujen kasvaminen niin suuriksi, että materiaalista irtoaa kulumispartikkeleita hauraasti murtumalla.

Palloventtiiliä operoitaessa esiintyy aina pitopintojen välistä hankausta. Pinnoitetta vaihtaessa tulisi löytää materiaali-parit, joiden  $H_m/H_a$  kovuuksien suhde ylittää arvon 1. Tällöin metallipintojen kulumisen loppuu kokonaan.

Alkuinvestoinniltaan kallein vaihtoehto on venttiilityypin muuttaminen non-contact-pallo-venttiilityypiin. Uuden venttiilityypin hankinta on aluksi kalliimpi kuin vanhan huoltaminen, mutta pitkällä aikavälillä huoltokustannukset ovat alhaisemmat. Non-contact-venttiilityyppi myös parantaa voimalaitoksen toimintavarmuutta, koska kulumisesta aiheutuva takertelu ei näissä malleissa esiinny.

## **12 Yhteenveto ja pohdinta**

Insinööriyössä saatuja tuloksia voidaan hyödyntää tulevaisuudessa venttiilityyppiä ja pinnoitemateriaalia valittaessa. Pallon tiivisteiden pinnoitteen tutkimuksen kannalta olisi ollut tärkeä saada suljinelin tutkittavaksi. Suljinelimestä olisi saanut tutkia pinnankarheuden suuruuden ja materiaalin, joilla on suuri merkitys adhesiivisen kulumisen alkamiseen. Lisäksi putkistossa virtaavasta väliaineesta olisi voinut tutkia sen magnetiittipitoisuutta ja sen vaikutusta tiivisteiden kulumiseen. Magnetiitti on yleinen rautaoksidi, jota esiintyy voimalaitosten prosessin vedessä. Lisäksi olisi syytä tarkastella venttiilin asennoitimen dataa ja sieltä erityisesti säätöherkkyyttä. Jatkuva edes takaisin säätöä kutsutaan hunting-ilmiöksi, joka rasittaa kohtuuttomasti venttiilin tiivisteiden pitopintoja.

Insinööriyö oli erittäin mielenkiintoinen ja antoi minulle paljon lisätietoa kulumiseen vaikuttavista tekijöistä ja eri kulumismekanismien vaikutuksesta koko kulumistapahtumaan. Työn ohella pääsin tutustumaan lukuisiin eri pinnoitteisiin ja niiden ominaisuuksiin. Näitä tietoja voin hyödyntää tulevaisuudessa työurallani.

## Lähteet

- 1 Fortum kotisivut. 2017. Verkkodokumentti. [http://www.fortum.com/fi/energiantuotanto/ydinvoima/loviisan\\_voimalaitos/pages/default.aspx](http://www.fortum.com/fi/energiantuotanto/ydinvoima/loviisan_voimalaitos/pages/default.aspx). Viitattu 2.2.2017.
- 2 Fortum Tilinpäätös vuodelta 2016. Verkkodokumentti. <http://www.fortum.com/fi/sijoittajat/pages/default.aspx>. Viitattu 10.2.2017.
- 3 STUK. 2017. Ydinturvallisuus. Verkkodokumentti. <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/124144/stuk-b126.pdf?sequence=1>. Viitattu 10.2.2017
- 4 RN-sivulauhdejärjestelmän esite. 2017. Fortum:n arkisto. Viitattu 25.1.2017.
- 5 Metson D-sarjan palloventtiili esite. 2017. Verkkodokumentti. <http://valveproducts.metso.com/documents/nelles/IMOs/fi/1D71fi.pdf>. Viitattu 3.2.2017.
- 6 Sparit, P. 1990. Venttiilikirja. Helsinki: Jamesbury Oy.
- 7 Nyman, J. 1998. Elementtimenetelmän soveltaminen palloventtiilin tiiviiden arviointiin. Lisensiaatintyö. Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto. Espoo.
- 8 Kivioja, S. Kivivuori, S. & Salonen, P. 2010. Tribologia- kitka, kuluminen ja voitelu 6. painos. Helsinki: Otatieto.
- 9 Mang, T. Bobzin, K. & Bartels, T. 2010. Industrial Tribology. Germany: WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA.
- 10 Adhesiivinen ja abrasiivinen kuluminen. 2017. Verkkodokumentti. <http://ru.pall.com/main/industrial-manufacturing/why-is-filtration-important-3779.page#top>. Viitattu 15.2.2017.
- 11 An introduction to electron microscopy. 2017. Verkkodokumentti. [http://www.nanolab.ucla.edu/pdf/Introduction\\_to\\_EM\\_booklet\\_July\\_10.pdf](http://www.nanolab.ucla.edu/pdf/Introduction_to_EM_booklet_July_10.pdf). Viitattu 20.2.2017.
- 12 SEM-analyysi. Verkkodokumentti. <http://www.seamk.fi/loader.aspx?id=5094138bf395-4f59-94d7-820aa25ced57>. Viitattu 6.2.2017

- 13 Ansaharju, T. Ilomäki, O. Katainen, H. Maaranen, K. & Mäkinen, A. 1989. Materiaalitekniikka. Porvoo: WSOY.
- 14 TWI Global. 2017. Verkkodokumentti. <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/hardness-testing-part-1-074/>. Viitattu 10.2.2017.
- 15 Analysaattori. 2017. Verkkodokumentti. <http://www.finfoocus.fi/tuotteet/libs-analysaattori-mpulse>. Viitattu 27.2.2017
- 16 Zhang, S. & Zhao, D. 2012. Aerospace materials Handbook. CRC Press.
- 17 Yao, M. & Collier, R. 2016. Hardfacing Alloys and Processes for Advanced Ultra-Supercritical. Verkkodokumentti. <http://www.valvemagazine.com/magazine/sections/beyond-valves/7694-hardfacing-alloys-and-processes-for-advanced-ultra-supercritical.html>. 5.7.2016. Viitattu 2.3.2017.
- 18 Korpiola, K. & Jokinen, P. 2000. Keraamipinnoitteiden valmistus HVOF-ruiskutuksella. Espoo: Otamedia Oy.
- 19 Konosphaera palloventtiili-esite. 2017. Verkkodokumentti. [www.valvitalia.com](http://www.valvitalia.com). Viitattu 5.3.2017.

## Metson palloventtiili, D-sarja

1 D 71 fi

19

## 12 TYYPPIMERKINTÄ

## PALLOVENTTIILI, D-SARJA

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
D2	D	E	06	D	A	E	02	G	/	01 M

Q-KOODI	TUOTEOPTIOT
Q	Perus Q-vaimennin kaasu ja neste sovelluksiin, Vain E- ja B-rakenteisessa yksitiivisteisessä pallon jättöpuolella.
Q2G	Q2-sulkuelin kaasusovelluksiin (yksitiivisteinen, rakenne E tai B).

1.	TUOTERYHMÄ
D	Keskeltä jaettu pesä, laakeroitu kaksiakselinen pallo, kansiholkki
STANDARDI	
D2, D1(F)	Täysiaukkoinen, laipallinen
EI-STANDARDI	
D3	Täysiaukkoinen, hitsauspääteellinen
D4	Supistettuaukkoinen, hitsauspääteellinen
D5	Supistettuaukkoinen, laipallinen

2.	PAINELUOKKA
C	ASME Class 150
D	ASME Class 300
F	ASME Class 600

3.	RAKENNE
STANDARDI	
A	Yleisrakenne, PTFE-laakerit, 2 tiivistettä lämpötila-alue: -50 °C...+230 °C
B	Yksitiivisteinen, yhteen suuntaan tiivis, metallilaakerit lämpötila-alue: -50 °C...+450/600 °C
E	Yksitiivisteinen, yhteen suuntaan tiivis, PTFE-laakerit, lämpötila-alue: -50 °C...+230 °C
H	Korkean lämpötilan rakenne, metallilaakerit, 2 tiivistettä, lämpötila-alue: -50 °C...+450/600 °C
EI-STANDARDI	
C	Matalan lämpötilan (Cryogenic) rakenne, PTFE-laakerit lämpötila-alue: -200 °C...+230 °C
S	Subsea-rakenne
Z	HAPPISOVELLUS RAKENNE Ei-metalliset osat on BAM testattu. Lämpötila-alue: -50 °C...+200 °C. Katso ohje: 100270en.pdf.
Y	Erikoinen

4.	KOKO (tuumina)
D1F	02, 03, 04, 06, 08, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28
D2D	04, 06, 08, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 26*, 28*, 30*, 32*, 36*
D2C	10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28*, 30*, 36*
D5F	03, 04, 06, 08, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24
D5D	06, 08, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28*, 30*, 32*, 36*
D5C	12, 14, 16, 18, 20, 24, 28*, 30*, 36*

<sup>\*)</sup> Laipat ASME B16.47 series A mukaan koossa 26" ja suuremmissa  
Laipat ASME B 16.5 mukaan kokoon NPS 24" asti.

5.	PESÄ	RUUVIT
STANDARDIMATERIAALIT		
A	CF8M	A4-80 / B8M
D	WCB	L7M / 2HM
Y	Erikoinen	

6.	PALLO
A	CF8M / AISI 316 + kromi**
D	CF8M / AISI 316 + NiBo, vain koot ≤ 24"
EI-STANDARDIT MATERIAALIT	
H	CA-6NM + kromi**
H3	CA-6NM + CrC, yleiskäytössä + 425 °C asti
R2	CF8M / AISI 316 + (W/Cr)C, Korrosioivat nesteet/ kosteat olosuhteet
R3	CF8M / AISI 316 + CrC, korkea lämpötila, > +400 °C
Y	Erikoinen

\*\*1) Pehmeiden tiivisteiden kanssa pallo ilman kromia

7.	PALLON TIIVISTEET
T	Pehmeä tiiviste
D	Pehmeä tiiviste, fire safe
S	Metallitiiviste
E	Metallitiiviste
H	Paljetitiiviste
C	Paljetitiiviste
K	Solids Proof -metallitiiviste
R	Fire safe -metallitiiviste

8.	STANDARDIMATERIAALIT			
	Taka-tiiviste	Jakotason-tiiviste	Akseli-tiiviste	Kierrejousi tai paljejousi
02	Viton GF	Grafiitti	Grafiitti	W X-750
03		Grafiitti	Grafiitti	B W.no.1.4418
		Grafiitti	Grafiitti	W X-750
EI-STANDARDIT MATERIAALIT				
63	Viton GF, grafiitti	Grafiitti	Grafiitti	W X-750

9.	RAKENTEEN LISÄTUNNUS
G	Vakio jousikuormitteinen grafiittinen akselitiiviste, ISO 15848-1 mukainen.
-	Jousikuormittamaton rakenne, poistettu myynnistä.

10.	LAIPAN TIIVISTEPINTA
-	ASME B16.5 raised face Ra 3.2-6.3 tai EN 1092-1 Type B1 (Ra 3.2-12.5) (ilman merkkiä)
05	Ring Joint

## Kennametal™ -kovapinnoitteet



### Hardfacing Alloys TIG and Oxy-Acetylene Welding

#### ■ TIG and Oxy-Acetylene Welding

ALLOY	NOMINAL ANALYSIS OF WELDING ROD <sup>1</sup>								Others	UNS	ASME/ AWS <sup>2</sup>	Hardness (HRC) <sup>3</sup>
	Co	Cr	W	C	Ni	Mo	Fe	Si				
COBALT-BASED ALLOY BARE WELDING RODS												
Stellite™ alloy 1	Bal.	32	12	2.45	<3.0	<1.0	<3.0	<2.0	<0.5	R30001	(SF)A 5.21 ERCoCr-C	51-56
Stellite™ alloy 6	Bal.	30	4-5	1.2	<3.0	<1.0	<3.0	<2.0	<0.5	R30006	(SF)A 5.21 ERCoCr-A	40-45
Stellite™ alloy 12	Bal.	30	8	1.55	<3.0	<1.0	<3.0	<2.0	<0.5	R30012	(SF)A 5.21 ERCoCr-B	46-51
Stellite™ alloy 20	Bal.	33	16	2.45	<3.0	<1.0	<3.0	<2.0	<0.5	—	—	53-59
Stellite™ alloy 21	Bal.	28	—	0.25	3	5.2	<3.0	<1.5	<0.5	R30021	(SF)A 5.21 ERCoCr-E	28-40*
Stellite™ alloy 22	Bal.	28	—	0.30	1.5	12	<3.0	<2.0	<0.5	—	—	41-49*
Stellite™ alloy 25	Bal.	20	14	0.1	10	<1.0	<3.0	<1.0	<0.5	—	—	20-45*
Stellite™ alloy 31	Bal.	26	7.5	0.5	10	—	<2.0	<1.0	<0.5	R30031	—	20-35*
Stellite™ alloy F	Bal.	26	12	1.7	22	<1.0	<3.0	<2.0	<0.5	R30002	(SF)A 5.21 ERCoCr-F	40-45*
Stellite™ alloy 107	Bal.	31	4	2	24	—	<2.0	<3.0	<0.5	—	—	38-47
Stellite™ alloy 190	Bal.	27	13.5	3.2	<1.0	<1.0	<3.0	1.0	<0.5	R30014	(SF)A 5.21 ERCoCr-G	54-59
Stellite™ alloy 250	Bal.	28	—	0.1	—	—	21	<1.0	<0.5	—	—	20-28
Stellite™ alloy 694	Bal.	28	19	1	5	—	<3.0	1	1%V	—	—	48-54
Stellite™ alloy 706	Bal.	31	—	1.2	<3.0	4	<3.0	<1.0	<1.0	—	—	39-44
Stellite™ alloy 712	Bal.	31	—	1.55	<3.0	8	<3.0	<2.0	<1.0	—	—	46-51
ULTIMET™ **	Bal.	26	2	0.06	9	5	3	—	<1.0	R31233	—	28-45*
NICKEL-BASED ALLOY BARE WELDING RODS												
Nistelle™ alloy C	—	17	5	0.1	Bal.	17	6	—	0.3%V	N30002	—	17-27*
Nistelle™ alloy 625	—	21	—	<0.10	Bal.	8.5	<5	—	3.3%	N06625	(SF)A 5.14 ERNiCrMo-3	—
Deloro™ alloy 40	—	12	—	0.4	Bal.	—	2-3	2.9	1.6% B	N99644	(SF)A 5.21 ERNiCr-A	36-42
Deloro™ alloy 50	—	12	—	0.5	Bal.	—	3-5	3.5	2.2% B	N99645	(SF)A 5.21 ERNiCr-B	48-55
Deloro™ alloy 55	—	12	—	0.6	Bal.	—	3-5	4.0	2.3% B	—	—	52-57
Deloro™ alloy 60	—	13	—	0.7	Bal.	—	3-5	4.3	3.0% B	N99646	(SF)A 5.21 ERNiCr-C	57-62
INTER-METALLIC LAVES PHASE ALLOY WELDING RODS (TRIBALLOY™ ALLOYS)												
Tribaloy™ alloy T-400	Bal.	8.5	—	<0.08	<1.5	28	<1.5	2.5	<1.0	R30400	—	54-58
Tribaloy™ alloy T-400C	Bal.	14	—	<0.08	<1.5	27	<1.5	2.6	<1.0	—	—	54-59
Tribaloy™ alloy T-401	Bal.	17	—	0.2	<1.5	22	<1.5	1.3	<1.0	—	—	47-53
Tribaloy™ alloy T-700 (Ni based)	<1.5	16	—	<0.08	Bal.	32	<1.5	3.4	<1.0	—	—	50-58
Tribaloy™ alloy T-800	Bal.	18	—	<0.08	<1.5	28	<1.5	3.4	<1.0	—	—	55-60
Tribaloy™ alloy T-900	Bal.	18	—	<0.08	16	22	—	2.7	<1.0	—	—	52-57

<sup>1</sup> Nominal analysis is a guideline only for standard product. Does not include all incidental elements and may differ depending on the exact specification/standard used when ordering.

<sup>2</sup> When written certification to a standard is required, please specify this when ordering. Certain products can also be certified to AMS, SAE, and other standards. Please contact us for more details.

<sup>3</sup> Unincluded weld metal.

\* Depending upon the degree of work hardening.

\*\*ULTIMET™ is a registered trademark of Haynes International.